
BACHELORARBEIT

Herr
Alexander Mahn

**Computersimulation als Planungs-
werkzeug für Raumakustik und
Beschallungstechnik,
am Beispiel des Sanierungsobjektes
„Alter Schafstall“ in Großpösna**

2014

BACHELORARBEIT

Computersimulation als Planungswerkzeug für Raumakustik und Beschallungstechnik, am Beispiel des Sanierungsobjektes „Alter Schafstall“ in Großpösna

Autor:
Herr Alexander Mahn

Studiengang:
Medientechnik

Seminargruppe:
MT08wF-B

Erstprüfer:
Prof. Dipl. Toningenieur Mike Winkler

Zweitprüfer:
Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

Einreichung:
Mittweida, 19.12.2014

THESIS

Computer simulation as a planning tool for room acoustics and public address systems, using the example of the refurbishment property „Alter Schafstall“ in Großpösna

author:

Mr. Alexander Mahn

course of studies:

media technology

seminar group:

MT08wF-B

first examiner:

Prof. Dipl. Toningenieur Mike Winkler

second examiner:

Prof. Dr.-Ing. Jörn Hübelt

submission:

Mittweida, 19.12.2014

Bibliografische Angaben:

Name, Vornahme: Mahn, Alexander

Thema der Bachelorarbeit:

Computersimulation als Planungswerkzeug für Raumakustik und Beschallungstechnik, am Beispiel des Sanierungsobjektes „Alter Schafstall“ in Großpösna.

Topic of thesis

Computer simulation as a planning tool for room acoustics and public address systems, using the example of the refurbishment property „Alter Schafstall“ in Großpösna.

81 Seiten, Hochschule Mittweida, University of Applied Sciences,

Fakultät Medien, Bachelorarbeit, 2014

Abstract

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Planung der Raumakustik und der Beschallungsanlage, anhand der Simulationssoftware EASE 4.4 am Sanierungsobjekt „Alter Schafstall“ in Großpösna. Hier soll in Zukunft ein multifunktionaler Veranstaltungsort für Live-Musik, Theateraufführungen und reine Sprachdarbietungen entstehen. Grundlage hierfür ist eine visionäre Nutzungsplanung, bevor überhaupt der Grundstein gelegt wird.

Ziel der Arbeit ist es, die Raumakustik und Beschallungstechnik zu simulieren und mit den raumakustischen Gütekriterien in Verhältnis zu setzen. Dabei sollen die Grenzen des Simulationsverfahren mit den Grenzen der akustischen Modellvorstellungen verglichen werden. Ausschlaggebend ist die Frage, welche Erkenntnisse überhaupt aus einer akustischen Simulation abgeleitet werden können?

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	XI
1 Einleitung.....	1
2 Grundlagen der Raumakustik.....	2
2.1 Wellentheoretische Raumakustik.....	2
2.2 Geometrische Raumakustik.....	7
2.2.1 Gekrümmte Wandflächen.....	14
2.3 Statistische Raumakustik.....	16
3 Nutzungskonzept des alten Schafstalls.....	17
3.1 Anforderungsprofil der Beschallungsanlage.....	20
4 Verfahren der Computersimulation.....	21
4.1 Raumimpulsantwort und Übertragungsfunktion.....	22
4.2 Erstellung der Primärstruktur.....	25
4.3 Erstellung der Sekundärstruktur.....	27
4.3.1 Absorptionsgrad.....	27
4.3.2 Streugrad s	33
4.4 Simulation von Beschallungsanlagen.....	33
4.5 Image Source Modell.....	45
4.6 Ray Tracing.....	46
4.7 Auralisation.....	47
5 Gütekriterien der Raumakustik.....	48
5.1 Nachhallzeit T_N	49
5.2 Hallradius r_H	52
5.3 Artikulationsverlust Δ cons für Sprache.....	53
5.4 Sprachübertragungsindex STI	55
5.5 Deutlichkeitsmaß C_{50} für Sprache.....	57
5.6 Klarheitsmaß C_{80} für Musik.....	58
5.7 Bassverhältnis BR	59
5.8 Nützliche und störende Reflexionen.....	60
5.9 Schwerpunktzeit t_s	61
5.10 Echo-Kriterium EK nach Dietsch und Kraak.....	62
5.11 Zusammenfassung optimaler Akustik.....	64
6 Fazit.....	65

7 Anhang.....	66
Literaturverzeichnis.....	X
Eigenständigkeitserklärung.....	XIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Rechtwinkliger Raum.....	5
Abbildung 2: geometrische Reflexion.....	7
Abbildung 3: Art der Reflexion in Abhängigkeit der Linearabmessungen b zur Wellenlänge λ	8
Abbildung 4: Spiegelung an ebener Wand.....	9
Abbildung 5: Spiegelung an zwei parallelen Wänden.....	10
Abbildung 6: Mehrfachreflexion an Raumkanten.....	11
Abbildung 7: Spiegelung des Rechtecks mit allseitig gleichförmiger Richtwirkung des Sendespiegelpunktes SP.....	12
Abbildung 8: Vermeidung von Flutter- Echos bei einem Rechteck- Grundriss (a) ohne Maßnahmen und (b) Vermeidung durch periodische Dreiecksstruktur (Winkel 5°).....	13
Abbildung 9: Reflexionswirkung gekrümmter Flächen als Kreis (a), Ellipse (b), Parabel (c) und Hyperbel (d).....	15
Abbildung 10: Lageplan Rittergut Großpösna.....	17
Abbildung 11: Links: Innenbereich mit Säulenstruktur. Rechts oben: Außenansicht. Rechts unten: Innenbereich Dachgeschoss.....	18
Abbildung 12: Links: Primärstruktur des alten Schafstalls (Gebäudehälfte des Veranstaltungssaumes) Rechts: Primärstruktur ohne Dachgeschoss einer möglichen Vision. (Mit Bühnenhaus und Verkleinerung der Säulenstruktur durch Stahlträger).....	19
Abbildung 13: links: Drahtgittermodell der Primärstruktur. Rechts: Beschreibung der Wandmaterialien (braun: Holzpaneele, hellgrau: Glattbeton, dunkelgrau: Rauputz, rot: Wandziegel).....	25
Abbildung 14: 2D- Schnitt des alten Schafstalls aus der Perspektive der x- und y- Achse.....	26
Abbildung 15: Testobjekt des alten Schafstalls mit Bühnenbereich.....	27
Abbildung 16: Modellierung der Publikumsflächen im alten Schafstall mit Holzstühlen.	30
Abbildung 17: Äquivalente Schallabsorptionsfläche von Publikum in m^2 pro Person im diffusen Schallfeld.....	30

Abbildung 18: frequenzabhängiger Absorptionskoeffizient einer Holzfaserplatte mit 10 cm Luftpolster vor einer starren Wand.....	31
Abbildung 19: frequenzabhängiger Absorptionskoeffizient einer Mineralfaserplatte mit $d = 4\text{cm}$	32
Abbildung 20: links: Kugelwelle, rechts: Zylinderwelle.....	35
Abbildung 21: links: Loudspeaker Aiming eines einzelnen d&b Q7 Topteils. (Kreise als Abstrahlkurve: rot = -3 dB, gelb = -6 dB, grün = -9 dB) Recht: DirectSPL Mapping für die gewählte Ausrichtung bei 1 kHz.....	38
Abbildung 22: Array Setting mit 5 x Q1 pro Seite. Die zwei orangen Rechtecke markieren die bestuhlten Hörerflächen innerhalb des alten Schafstalls. Ohrhöhe bei 1,2m....	39
Abbildung 23: Seitenansicht der vertikalen Abdeckung des Arrays.....	40
Abbildung 24: Isometrische Ansicht für 3 x Q1 pro Seite bei 4 kHz.....	40
Abbildung 25: Wirkungsweise des CPL Filters.....	41
Abbildung 26: 2x Q Sub. Links: Abstand 7m. Rechts: Abstand 1m, mit akustischer Kopplung bei 50 Hz.....	42
Abbildung 27: 2x CSA Stack im Abstand von 1m, mit jeweils 3 Q-Sub übereinander bei 50 Hz. Mittlerer Q-Sub wird im Stack um 180° gedreht und an einem separaten Verstärkerkanal im CSA Modus betrieben.....	43
Abbildung 28: Gerichtete Abstrahlung mit 8xV-SUB im Abstand von 1m bei links 50 Hz und rechts 100 Hz.....	43
Abbildung 29: Room Mapping - DirectSPL bei 1 kHz.....	44
Abbildung 30: Room Mapping - D/R - Ratio bei 1 kHz.....	44
Abbildung 31: Mirror Image der 1. Ordnung für drei Empfängerplätze.....	45
Abbildung 32: Ray Tracing vom einem Strahl bis zur 5. Ordnung.....	47
Abbildung 33: Standard Rendering des alten Schafstalls als Konzept.....	49
Abbildung 34: Nachhallzeit nach Sabine für die Grundstruktur des alten Schafstalls...	51
Abbildung 35: starke Reduzierung des Nachhalls bei linearem 80% Absorber nur im Deckenbereich.....	52
Abbildung 36: Alcons bei 1 kHz für das Q1 Setup mit sehr guten bis guten Werten.....	54
Abbildung 37: STI bei 1 kHz für das Q1 Setup mit sehr guten bis guten Werten.....	56
Abbildung 38: C50 bei 1 kHz für das Q1 Setup mit sehr guten bis guten Werten.....	58

Abbildung 39: C80 bei 1 kHz für das Q1 Setup. Mit hohem C80 Wert von 11 dB aufgrund des Direktschall.....	59
---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anforderungsprofile von Beschallungsanlagen.....	20
Tabelle 2: frequenzabhängige Luftdämpfungskonstante m bei 20°C und 1013 hPa (Multiplikation der Werte mit 10^{-3} für Meter $^{-1}$).....	29
Tabelle 3: Zusammenhang STI und Alcons.....	56

1 Einleitung

In Zeiten immer fortschreitender und leistungsfähiger Hardware und Software, ist die computerbasierte Simulation in vielen Bereichen der Wissenschaft und im Dienstleistungssektor ein wichtiges Hilfsmittel geworden. Hierbei werden Modelle zur Veranschaulichung komplexer Zusammenhänge erstellt. Im Bereich der Raumakustik und Beschallungstechnik hat sich die Computersimulation zu einem entscheidenden Planungswerkzeug entwickelt.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Planung der Raumakustik und der Beschallungsanlage, anhand der Simulationssoftware EASE 4.4 am Sanierungsobjekt „Alter Schafstall“ in Großpösna. Hier soll in Zukunft ein multifunktionaler Veranstaltungsort für Live-Musik, Theateraufführungen und reine Sprachdarbietungen entstehen. Grundlage hierfür ist eine visionäre Nutzungsplanung.

Ziel der Arbeit ist es, die Raumakustik und Beschallungstechnik zu simulieren und mit den raumakustischen Gütekriterien in Verhältnis zu setzen. Dabei sollen die Grenzen des Simulationsverfahren mit den Grenzen der akustischen Modellvorstellungen verglichen werden. Ausschlaggebend ist die Frage, welche Erkenntnisse überhaupt aus einer akustischen Simulation abgeleitet werden können?

Im Punkt 2 werden die Grundlagen der raumakustischen Modelle diskutiert. Im dritten Teil werden ein Nutzungskonzept und die damit verbundenen Planungsziele erstellt. Darauf aufbauend soll im Punkt 4, aus den Verfahren der akustischen Computersimulation, sukzessive der virtuelle Raum entstehen und bewertungsfähig werden. Danach werden die Gütekriterien der Raumakustik als Erfahrungswerte betrachtet. Diese dienen als praktische Anhaltspunkte zur Interpretation der möglichen Simulationsergebnisse.

Das Gesamtziel ist eine Untersuchung, inwieweit die akustische Computersimulation, im Frühstadium der Gebäudeplanung, als Entscheidungshilfe zur realen akustischen Planung beitragen kann.

2 Grundlagen der Raumakustik

In der Raumakustik werden die komplexen akustischen Zusammenhänge bei der Bewertung von Schallereignissen von Schallquelle zu Empfänger, innerhalb eines Raumes beschrieben. Ziel einer raumakustischen Planung ist es vorrangig, die Qualität des Höreindrucks an jeder Position im Raum zu optimieren. Diese Maßnahmen zur Optimierung können sich dabei nur am entsprechenden Nutzungsprofil des Raumes orientieren. Steht die reine Sprachübertragung im Vordergrund, sind andere Eingriffe in die Raumstruktur erforderlich als bei der hörsamen Übertragung von Musik in klassischen Konzertsälen. Durch diese Überlegungen, werden verschiedene Klassifizierungen von akustischen Räumen, mit oder ohne elektroakustischer Anlage herangezogen.¹

Grundsätzlich wird die Schallübertragung durch drei Faktoren beeinflusst. Die sogenannte Primärstruktur beschreibt die geometrische Raumform. In der Sekundärstruktur werden Aussagen über die Beschaffenheit und Ausgestaltung der Oberflächen im Raum getroffen. Hierbei geht es primär um Absorptions- und Reflexionsgrade. Im dritten Faktor werden die Positionen der Schallquellen und Schallempfänger beschrieben.

Weiterhin lassen sich die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik in drei Teilbereiche gliedern. In die wellentheoretische, geometrische und statistische Raumakustik. Alle drei Modelle haben Vor- und Nachteile und eignen sich jeweils für unterschiedliche Phänomene der Raumakustik.

2.1 Wellentheoretische Raumakustik

Wellentheoretische Betrachtungen der Raumakustik werden mittels der Wellengleichungen beschrieben und kommen, aufgrund ihrer mathematischen Komplexität, vorrangig bei idealisierten und einfachen Raumgeometrien zum Einsatz. „Wellentheoretische Effekte treten dann in Erscheinung, wenn die betrachteten Wellenlängen in die Größenordnung der geometrischen Dimension der beteiligten Räume und Gegenstände kommen oder bei Vorgängen, die im Abstand von wenigen Wellenlängen zu Bauteilen auftreten.“²

1 Vgl. Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 206

2 Maier P., 2008: Seite 282

Diesbezüglich wird die Wellentheorie auch im Tieftonbereich eingesetzt, bspw. zur Beschreibung stehender Wellen. Wenn sich also Primär- und Reflexionswelle genau in der Phase überlagern. Die Wellenbäuche werden als Maxima verstärkt und die Knotenpunkte als Minima überhaupt nicht, wodurch jeder Ortspunkt unterschiedliche Bewegungsamplituden aufweist. Zwischen zwei, vier und sechs Wänden werden diese Phänomene als Axial,- Tangential,- oder Schrägmoden bezeichnet. Die physikalische Betrachtung dieser Moden ist für die Akustik und Tontechnik ungemein bedeutsam, denn stehende Wellen treten prinzipiell in allen natürlichen Räumen auf. Entscheidend für Ihre störende Wahrnehmung ist die Lage und Dichte der Resonanzen. Je höher die Ordnung der Grundschwingung mit der halben Wellenlänge des Wandabstandes, desto dichter liegen die Raummoden und überlagern sich. In hinreichend großen Räumen liegen die Grundschwingungen der Moden meist unterhalb der menschlichen Hörschwelle. Je kleiner die Linearabmessungen, desto höher liegen die Frequenzen der ersten Raummoden und je größer die Abstände der Resonanzspitzen, um so stärker wird der störende Einfluss auf die Linearität des Frequenzgangs im Raum. Für die akustische Optimierung von bestimmten Raumverhältnissen ist dies ein ernstes Problem, denn stehende Wellen und deren Lage, bedingt durch die Seitenverhältnisse der Wände, können nicht einfach unterbunden oder neutralisiert werden. Gegenüberliegende, schräge Wandflächen können zwar den Axialmoden höherer Ordnung, durch schrägen Schalleinfall, Energie entziehen, aber für die besonders störenden Grundschwingungen wirken die Wände weiterhin parallel.

Für eine akustische Planung bedeutet dies dem Schallfeld Energie zu entziehen und zwar dort wo der Schalldruck für die Eigenresonanzen des Raumes maximal wird. Frequenzselektive Resonanzabsorber befinden demnach meist an Wandflächen und Ecken. Eine Dämpfung des Schalldrucks im Tieftonbereich ist jedoch oftmals mit Platzverlust verbunden, was bei der Planung berücksichtigt werden muss (Punkt 3.3.1). Auch die Richtung der Schallabstrahlung von Lautsprechern beeinflusst die modale Anregung des Raumes. Eine Abstrahlung in die Raumecken wird eher Tangential- als Axialmoden hervorrufen. Mit Hilfe der wellentheoretischen Raumakustik ist es prinzipiell möglich alle Ausbreitungsformen des Schalls zu beschreiben. Vor allem hinsichtlich komplexer Phänomene wie Brechung, Beugung, phasenbezogener Kammfiltereffekte und den Eigenfrequenzen. Der mathematische Aufwand der Berechnungen steigt aber enorm mit der Unregelmäßigkeit des Raumes.

Die Leistungsfähigkeit von Computern wird jedoch hinsichtlich Mehrkernprozessoren immer besser bzw., werden durch die Optimierung von Software auf parallele Prozesse, gleichzeitige Operationen ermöglicht. Die moderne Simulationstechnik setzt daher immer mehr auf Verfahren wie die Finite-Element-Methode, wodurch komplexe Differentialgleichungen gelöst bzw. Näherungslösungen gefunden werden können. Nichtsdestotrotz wird es auch in der Zukunft darum gehen die Rechenzeiten zu verkürzen. Außerdem können in der akustischen Computersimulation noch nicht alle Programme auf diese relativ neuen Berechnungsverfahren zurückgreifen. Auch die vorliegende Programmversion von EASE 4.4. unterstützt dies nicht.

Der wellentheoretische Ansatz ist eine mathematische Beschreibung, bei welchem die Kenngrößen des Schallfeldes, jedem Punkt eines Raumes, orts- und zeitabhängig zugeordnet werden können. Die Kenngrößen der Wellengleichung sind der skalare Schalldruck p , die vektorielle Schallschnelle \vec{v} , die Raumkoordinaten und die Zeit t .³ Zusätzlich wird bei Wöhle die Wellengleichung für das Schallschnellepotential zur leichteren Berechnung des Schalldrucks und der Schallschnelle erwähnt.⁴

Die Helmholtzgleichung (Gl 2.1-1) beschreibt grundlegend ein dreidimensionales Wellenfeld zum Zeitpunkt t_0 .

$$\Delta p + k^2 p = 0 \quad \text{Gl. 2.1-1} \quad \text{mit Kreiswellenzahl } k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi f}{c} \quad \text{Gl. 2.1-2}$$

Oder im kartesischen Koordinatensystem als

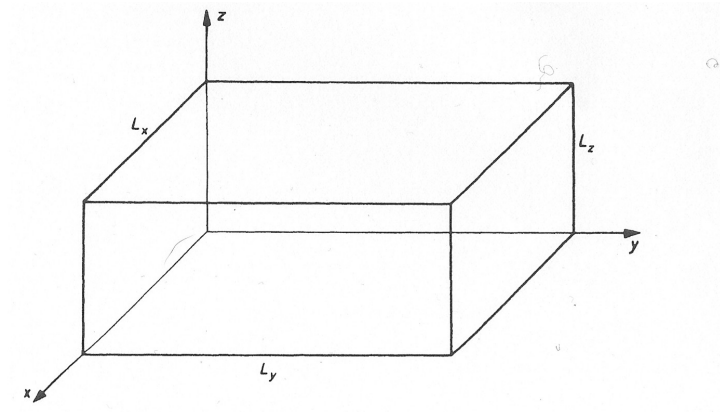
$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + k^2 p = 0 \quad \text{Gl 2.1-3}$$

In der Annahme einer rechtwinkligen Raumstruktur, in der Form eines leeren Quaders, kann die Differentialgleichung im einfachsten Fall für theoretisch absolut schallharte Wände gelöst werden. Der Schalldruck wird dabei für alle Begrenzungsflächen des Raumes maximal.⁵

3 Vgl. Wöhle W., 1984: Seite 23

4 Vgl. edb.: Seite 24

5 Hierbei sei angemerkt, dass es in der Realität keine absolut schallharten Wände gibt. Hallräume haben einen Absorptionsgrad von ca. 0,02. Wäre der Absorptionsgrad exakt 0, könnte sich ein Schallfeld nur für die Eigenfrequenzen des Raumes aufbauen. Genauso wie sich in Räumen, mit theoretisch unendlicher Bedämpfung, nur Direkt-schall ausbreiten könnte. Für nicht schallharte Wände muss die spezifische Wandimpedanz ζ einbezogen werden.

Abbildung 1: Rechtwinkliger Raum.⁶

$$1. \quad \frac{dp_1}{dx} = 0$$

$$2. \quad \frac{dp_2}{dy} = 0$$

$$3. \quad \frac{dp_3}{dz} = 0$$

$$1. \quad \frac{d^2 p_1}{dx^2} + k_x^2 p_1 = 0$$

$$2. \quad \frac{d^2 p_2}{dy^2} + k_y^2 p_2 = 0$$

$$3. \quad \frac{d^2 p_3}{dz^2} + k_z^2 p_3 = 0$$

Analog dazu die Wellenzahl mit

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = k^2 \quad \text{Gl.2.1-4}$$

Durch Einsetzen der Randbedingungen für $x=0$ nach $x=L_x$ ergibt sich folgende Lösung. Analoge Ergebnisse für $p_2(y)$ mit $y=L_y$ und für $p_3(z)$ mit $z=0$ nach $z=L_z$

$$p_1(x) = A_1 \cos(k_x x) + B_1 \sin(k_x x) \quad \text{Gl.2.1-5}$$

Damit die Randbedingung $x=0$ erfüllt wird, muss dem zur Folge B_1 gleich Null gesetzt werden (Gl. 2.1-6). Für die zweite Randbedingung $x=L_x$. Für $p_2(y)$ und $p_3(z)$ erhalten wir analoge Werte für k_y und k_z (Gl. 2.1-7)

⁶ Kuttruff H., 2000: Seite 64

$$p_1(x) = A_1 \cos(k_x x) \quad \text{Gl. 2.1-6} \quad k_x = \frac{n_x \pi}{L_x} \quad \text{Gl. 2.1-7}$$

Durch Einsetzen von k_x , k_y und k_z in die Gleichung 2.1-4, ergibt sich

$$k_{n_x n_y n_z} = \pi \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad \text{Gl.2.1-8}$$

Die Koeffizienten n_x , n_y , n_z sind dabei die Ordnungszahlen der Raummoden und geben die Gitternetzknotebenen des Schalldrucks für die Randbedingungen an.⁷ Sollen nun die Eigenfrequenzen des Raumes berechnet werden, erhalten wir nach Gleichung 2.1-9 für jede Koordinatenachse eine Eigenschwingung bzw. Resonanz des Raumes.

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} k_{n_x n_y n_z} \quad \text{Gl.2.1-9}$$

$$f_{n_x n_y n_z} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{n_x}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{n_y}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n_z}{L_z}\right)^2} \quad \text{Gl.2.1-10}$$

Die komplette Anzahl der Eigenschwingungen N im Raum bis zu einer Grenzfrequenz f_u , werden mit den Kantenlängen L , des Raumvolumens V und gesamten Wandfläche A berechnet.

$$N = \frac{4\pi f_u^3 V}{3c^3} \frac{\pi f_u^2 A}{4c^2} \frac{f_u L}{8c} \quad \text{Gl. 2.1-11}$$

2.2 Geometrische Raumakustik

Dieser Teilbereich beschäftigt sich mit der geometrischen Schallreflexion und folgt den Reflexionsgesetzen der Optik.⁸ Dabei wird das Konzept einer Schallwelle, durch das eines Schallstrahls ersetzt, in der vereinfachten Anwendung für große, schallharte Reflexionsflächen im Verhältnis zur Wellenlänge λ der Schallwelle.

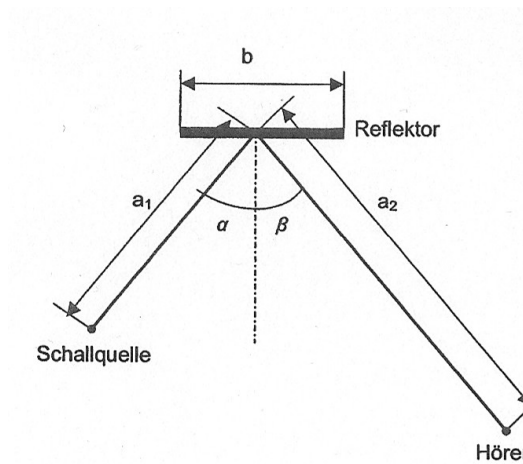


Abbildung 2: geometrische Reflexion⁹

Abbildung 2 zeigt eine zweidimensionale Darstellung der geometrischen Schallreflexion an einer Fläche b mit $b < \lambda$ und dem daraus folgenden Einfallswinkel α gleich dem Ausfallswinkel β . Diese Eigenschaften der Fläche b als Reflektor erfolgen bis zu einer unteren Grenzfrequenz f_u . Diese liegt tiefer, je größer die Fläche b , je kleiner der Abstand a_1 und a_2 und je kleiner der Schalleinfallswinkel α .

$$f_u = \frac{2c}{b^2 \cos^2 \alpha} \cdot \frac{a_1 a_2}{(a_1 + a_2)}; \quad a_1 a_2 > b \quad [\text{Hz}] \quad \text{Gl. 2.2-1}$$

⁸ Ebd., 2000: Seite 89

⁹ Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 228

In der Raumakustik kommen jedoch nicht nur geometrische Reflexionen vor. Also besteht die Hauptproblematik darin, das Verhalten der verschiedenen Wellenlängen des Schalls auf Hindernisse, Begrenzungsflächen und deren Oberflächenbeschaffenheit zu beschreiben.

So liegt beispielsweise die größte Wellenlänge des tiefsten Tons eines klassischen Flügels, nach wohltemperierter Stimmung, bei ca. 12,5 m und die kleinste Wellenlänge des höchsten Tons bei ca. 0,082 m (nach Gl. 2.2-2).¹⁰

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad \text{Gl. 2.2-2}$$

λ : Wellenlänge des Schalls in m

c : Schallgeschwindigkeit mit 343 m/s (bei einer Lufttemperatur von 20° C)

f : Frequenz des Schalls in Hz

Um die Abhängigkeit der Reflexionswirkung von der Wellenlänge nach Abbildung 3 zu verdeutlichen, schreibt Cremer: „Stellen wir uns z.B. eine zickzackgeführte Wand vor, so wirkt sie bei tiefen Frequenzen wie eine flache Wand, also wie ein Plan Spiegel, bei mittleren Frequenzen erzeugt sie eine mehr oder weniger diffuse Reflexion, während sie sich bei ganz hohen Frequenzen in einzelne geneigt Spiegel aufteilt.“¹¹

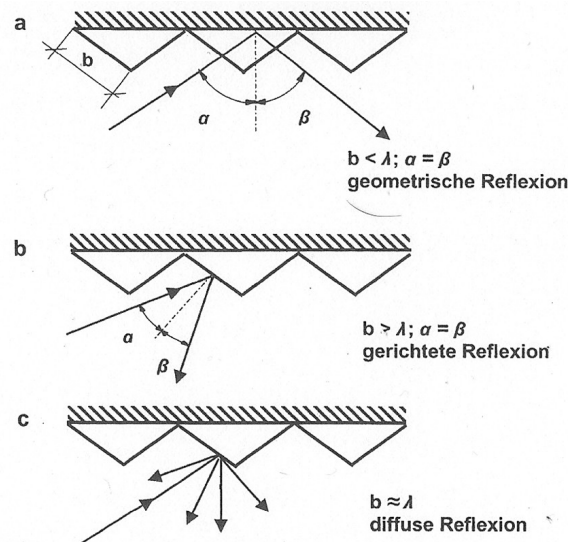


Abbildung 3: Art der Reflexion in Abhängigkeit der Linearabmessungen b zur Wellenlänge λ ¹²

¹⁰ mit einer Schallgeschwindigkeit $c = 343$ m/s (bei einer Lufttemperatur von 20°C)

¹¹ Cremer L., 1978: Seite 14

¹² Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 227

Im Praxisbezug kommt die geometrische Raumakustik, trotz Ihrer Vernachlässigung von Beugungseffekten und diffuser Reflexion, relativ häufig zum Einsatz. Also immer dann, wenn die Wege der Schallausbreitung eine Rolle spielen sollen. Geläufig werden daher auch die diffusen Schallrückwürfe mit Schallstrahlen verdeutlicht.

Da in dieser Arbeit das akustische Modell anhand einer Computersimulation erstellt werden soll, sind die Prinzipien der Strahlenverfolgung (Ray Tracing) und der Spiegelquellenmethode (Image Source Model) besonders wichtig. In der einfachsten Art und Weise geht von der Schallquelle ein kurzer Impuls aus, welcher auf eine naheliegende Wandfläche als Spiegel trifft (Abbildung 4). Die Schallstrahlen der Schallquelle S_0 breiten sich geradlinig aus und bilden im Querschnitt einen Kreis als Wellenfront. Nach dem Gesetz der geometrischen Reflexion folgt beim Eintreffen der Strahlen auf die Wand, ein Rückwurf mit Eintrittswinkel gleich dem Austrittswinkel. Aus der Abbildung wird deutlich, dass sich die rückwärtigen Strahlen in einem Punkt S_1 schneiden, welcher im gleichen Abstand von S_0 zur Wand wie ein Spiegelbild wirkt. Für den Höher erscheint S_1 wie eine neue Schallquelle, wodurch eine neue Wellenfront um S_1 als Spiegelquelle erster Ordnung entsteht und die Wellenfront von S_0 überlagert.¹³

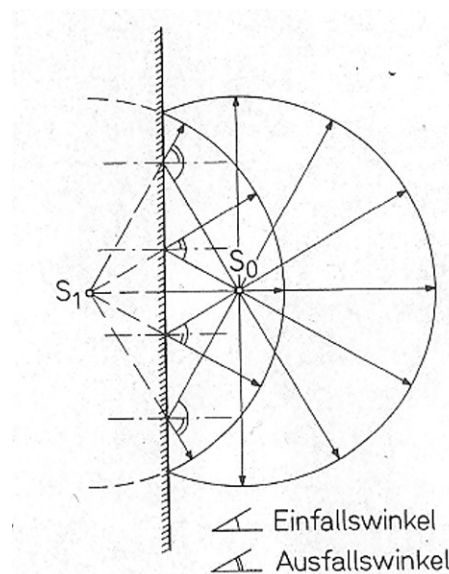


Abbildung 4: Spiegelung an ebener Wand¹⁴

¹³ Vgl. Cremer L., 1978: Seite 21

¹⁴ Ebd.: Seite 21

In Anlehnung an den im Punkt 2.1 beschriebenen idealisierten Quader, folgen nun zwei weitere Spiegelquellen an den gegenüberliegenden Wandflächen (Abbildung 5).¹⁵ Die linke Spiegelquelle S_1 wird an der rechten Wand und die rechte Spiegelquelle S_1 an der linken Wand gespiegelt. So entstehen die gegenüberliegenden Spiegelquellen S_2 der 2. Ordnung. Für den Hörer ergeben sich prinzipiell unterschiedliche Schallquellen, welche, abhängig von seiner Position im Raum, mit Laufzeitunterschieden verschieden stark wahrgenommen werden.

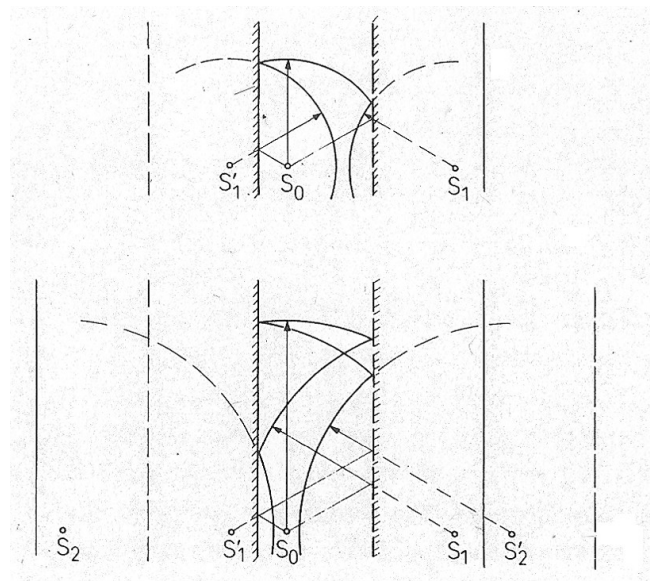


Abbildung 5: Spiegelung an zwei parallelen Wänden¹⁶

Um die Methode der Strahlenverfolgung und Spiegelquellen weiter zu erläutern, werden bezüglich des „Idealen Quaders“ nun rechtwinklige Ecken eingetragen. Abbildung 6 zeigt die Mehrfachreflexion an Raumkanten. Dabei wird deutlich, dass es nur zu Reflexionen bis zur 2. Ordnung kommt. Für den Fall der senkrecht aufeinander stehenden Flächen (Abbildung 6a), verläuft der Schallstrahl nach zweifacher Reflexion immer in seiner der Ursprungsrichtung entgegengesetzten Richtung. Für den Fall das der Strahl genau im Scheitelpunkt des Rechtecks landet, verläuft dieser genau zur Schallquelle zurück.

¹⁵ Abbildung 5 zeigt die Spiegelung an unendlich ausgedehnten Flächen ohne Eckreflexionen

¹⁶ Cremer L., 1978: Seite 22

Dies kann vermieden werden, wenn die Winkel nach Abbildung 6b und 6c zu stumpfen oder spitzen Winkeln gestaltet werden. In beiden Fällen wird die Wellenfront der Spiegelpunkte S_2 unterbrochen bzw. überlagert.

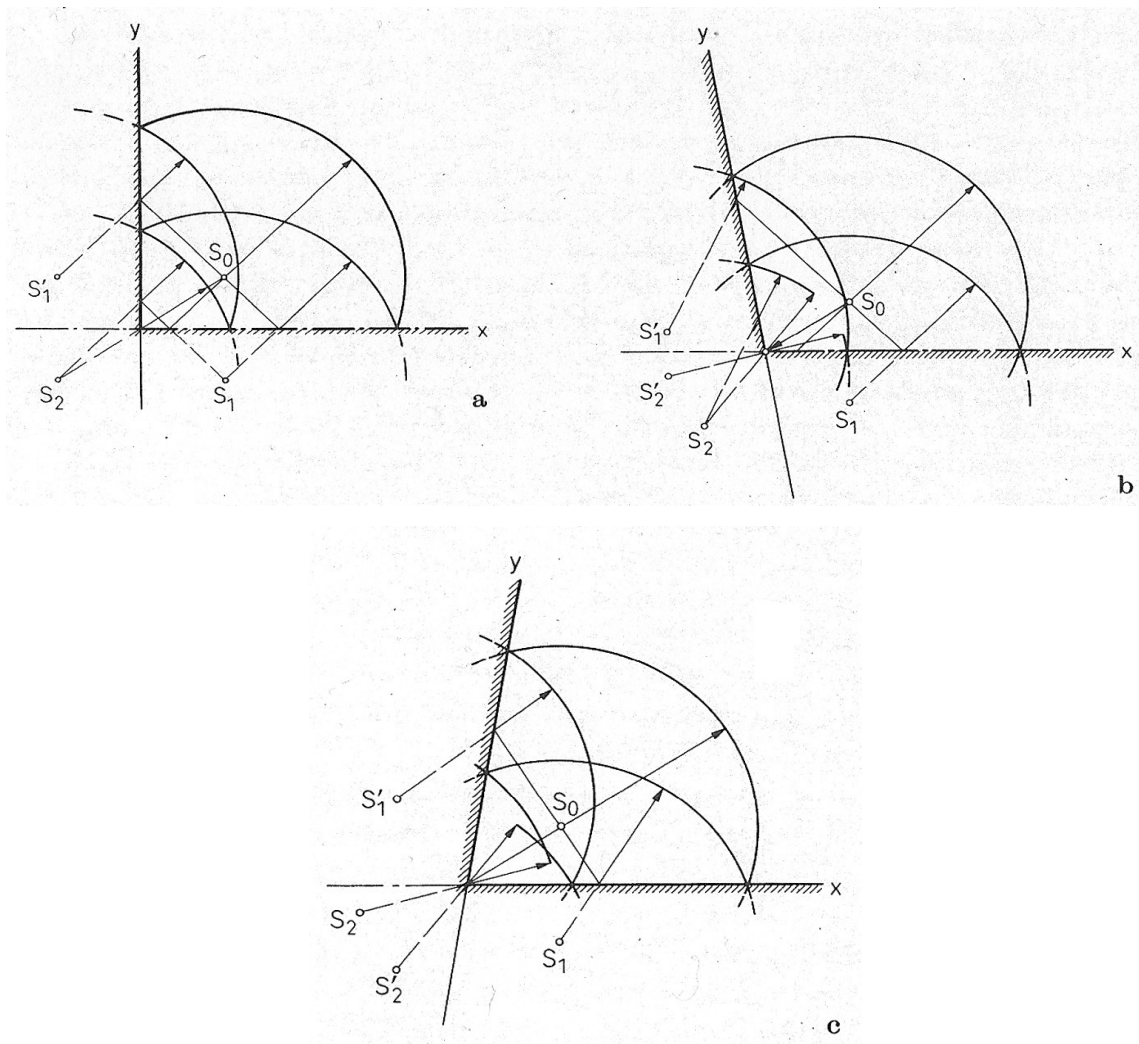


Abbildung 6: Mehrfachreflexion an Raumkanten¹⁷

Nun wird der Sender als Beobachtungspunkt in ein komplettes Rechteck platziert. Abbildung 7 zeigt die Spiegelbilder zu allen Seiten, mit einem Sender der kugelförmig abstrahlt.¹⁸

¹⁷ edb.: Seite 24

¹⁸ Die Strahlenverfolgung ändert sich mit der Richtcharakteristik. Eine gerichtete Schallquelle wird rein geometrisch als einzelner Strahl verfolgt.

Die Anzahl der Spiegelflächen (Gl. 2.2-3) richtet sich nach der Ringfläche der Radien ct und $c(t + \Delta t)$ und der Rechteckfläche. Das Intervall Δt beschreibt die Zeit, von den Spiegelquellen im Ring zum Beobachtungspunkt.

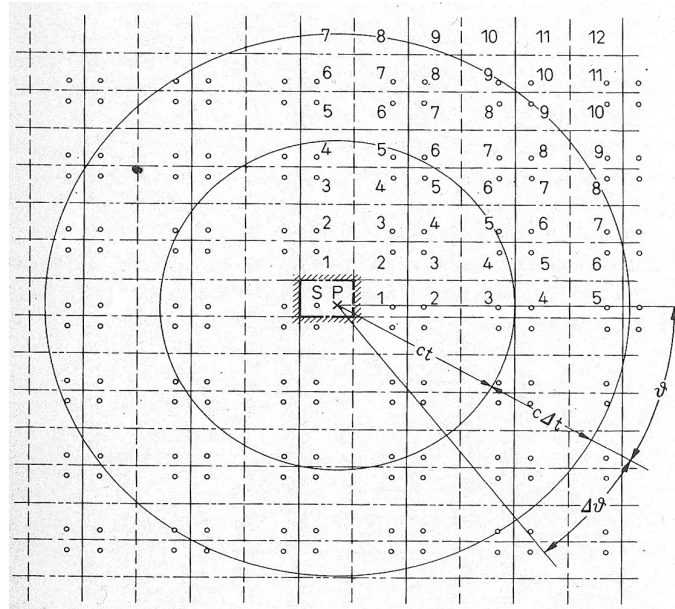


Abbildung 7: Spiegelung des Rechtecks mit allseitig gleichförmiger Richtwirkung des Sendespiegelpunktes SP^{19}

$$\Delta n = \frac{2\pi c^2 t \Delta t}{l_1 l_2} \quad \text{Gl.2.2-3}$$

$$\Delta(\Delta n) = \Delta n \frac{\Delta \vartheta}{2\pi} = \frac{c^2 t \Delta t \Delta \vartheta}{l_1 l_2} \quad \text{Gl.2.2-4}$$

Die Beschreibung der Wellenfront nach der Zeit t erfolgt dabei durch den Radius ct , welcher gleichzeitig alle Spiegelpunkte in diesem Zeitpunkt erfasst. Die Anzahl der Spiegelpunkte in einer bestimmten Richtung wird nach Abbildung 7 zwischen ϑ und $\Delta\vartheta$ bestimmt (Gl. 2.2-4).

Wobei die Vorzugsrichtung der Schallverlaufs abhängig von seiner Quellenposition ist, sich jedoch bei ausreichend großem Zeitabstand Δt immer weiter vernachlässigen lässt.²⁰ Wirken hingegen zwei gegenüberliegende Wandflächen stark absorbierend, kann es zwischen den schallharten, parallelen Wänden, zu impulsartigen und schnellen Schallrückwürfen kommen. Diese werden bei Cremer als „Flutter- Echos“ bezeichnet.²¹

Um die ungünstige Eigenschaft einer starken Richtungswirkung paralleler Wandflächen zu vermeiden, dennoch aber eine gleichmäßige Raumerfüllung zu erzielen, werden in der Praxis verschiedene Maßnahmen ergriffen. Im Sinne der Primärstruktur wird dies oftmals in Anlehnung eines Trapezes, d.h. durch einen schiefwinkligen Raum erreicht. In der Praxis ist die Konstruktion eines allseitig schiefwinkligen Raumes natürlich entsprechend aufwändig.

Abbildung 8 zeigt die Wirkung paralleler Wände ohne Maßnahmen (8a) und mit Wand-schrägstellungen durch periodische Dreiecksstrukturen (8b). Bei entsprechender Dimensionierung hinsichtlich der Grenzfrequenz (Gl. 2.2-1) können dies auch andere geometrische Formen sein.

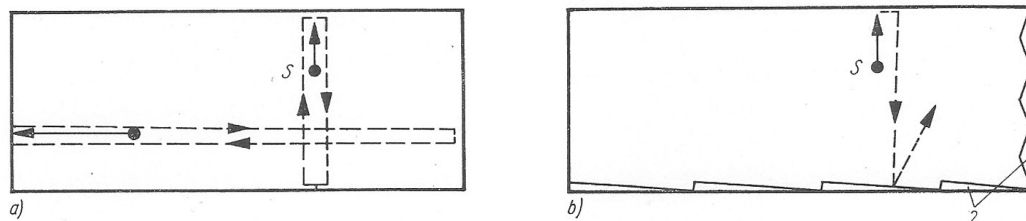


Abbildung 8: Vermeidung von Flutter- Echos bei einem Rechteck- Grundriss (a) ohne Maßnahmen und (b) Vermeidung durch periodische Dreiecksstruktur (Winkel 5°)²²

²⁰ Die Betrachtungsweise der Raumerfüllung ist rein geometrisch und lässt die Frage nach der Schallintensität außer acht

²¹ Vgl. Cremer L., 1978: Seite 27

²² Fasold W., Sonntag E., Winkler H., 1987: Seite 260

Die Aufrechnung der Spiegelquellen zum dreidimensionalen Quaderraum erfolgt dabei mit dem gesamten Raumvolumen und dem einer Kugelschale im Zeitraum t und Δt . Analog zur Gleichung 2.2-4 kann die Anzahl der Spiegelsender im Quader für den Raumwinkel $\Delta\Omega$ nach Gleichung 2.2-6 berechnet werden.

$$\Delta n = \frac{4\pi c^3 t^2 \Delta t}{l_1 l_2 l_3} \quad \text{Gl.2.2-5}$$

$$\Delta(\Delta n) = \frac{\Delta\Omega}{4\pi} = \frac{c^3 t^2 \Delta t \Delta\Omega}{l_1 l_2 l_3} \quad \text{Gl.2.2-6}$$

2.2.1 Gekrümmte Wandflächen

Zur Beschreibung der Reflexionen an gekrümmten Wandflächen kommen Hohlspiegelgesetze zum Einsatz. Diese stehen freilich ebenfalls in der Abhängigkeit der Wellenlänge zur Größe der Begrenzungsfläche. In der Akustik sind gekrümmte Flächen besonders kritisch zu betrachten. Analog zur Optik, erzeugen konkave Strukturen unter bestimmten Bedingungen brennpunktartige Schallkonzentrationen, während konvexe Wandelemente schallstreuend wirken. Abbildung 9 zeigt vier verschiedene Reflexionen an gekrümmten Flächen anhand der Hohlspiegelgesetze.

Eine Annäherung zur geometrischen Beschreibung erfolgt durch die Hohlspiegel-Beziehung, mit der Entfernung s des Sendeortes S vom Scheitelpunkt P und der Entfernung e des Empfangsortes E vom Scheitelpunkt P . Diese stehen im Verhältnis zum Radius r des Kreisbogens mit dem Kreismittelpunkt M .

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{e} = \frac{2}{r} \quad \text{Gl.2.2-7}$$

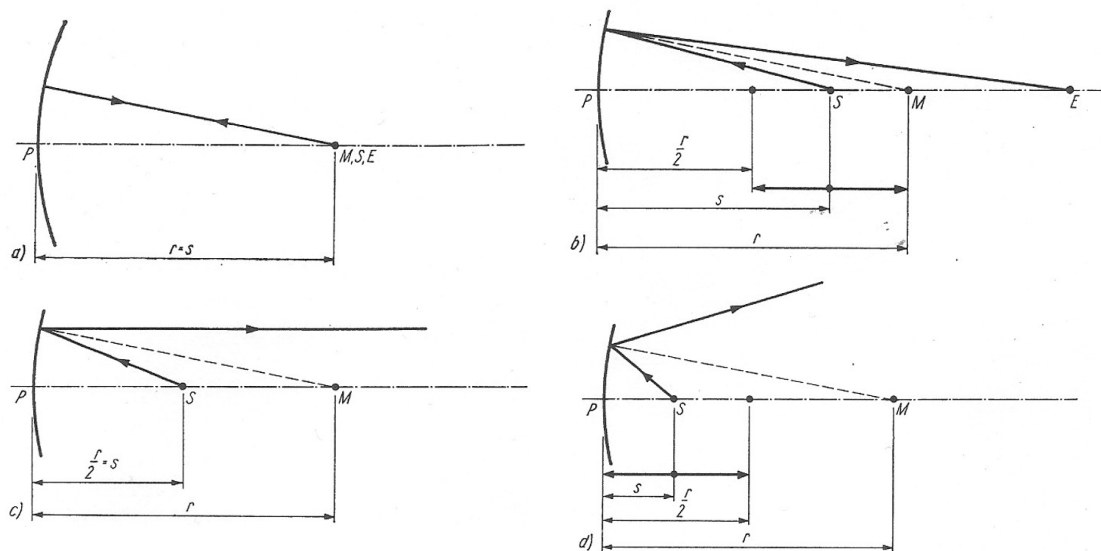


Abbildung 9: Reflexionswirkung gekrümmter Flächen als Kreis (a), Ellipse (b), Parabel (c) und Hyperbel (d).²³

1. Abbildung 9 a) – Kreiswirkung: $s=r$ mit der Konzentration der Schallstrahlen am Mittelpunkt M, welcher gleichzeitig Sende- und Empfangsort ist. Dieser Brennpunkt kann auch entstehen, wenn sich der Sendeort außerhalb der Raumachse befindet. Kreisbögen als Begrenzungsfläche sind gerade hinsichtlich verhältnismäßig großer Radien zu vermeiden, da sich auch alle späten Reflexionen wie Echos bündeln.

2. Abbildung 9 b) – Ellipsenwirkung: Der Sendeort befindet sich zwischen dem halben und dem vollen Krümmungsradius. Der Empfangsort kann damit analog zur Kreiswirkung zu einem Brennpunkt werden. Möglicherweise im Bühnen- oder Publikumsbereich. Dies sollte ebenfalls vermieden werden.

3. Abbildung 9 c) – Parabelwirkung: Hier ist der Sendeort gleich dem halben Krümmungsradius, mit $s=r/2$. Der Konzentrationspunkt, bzw. Empfangsort liegt quasi im Unendlichen als achs- paralleles Strahlenbündel. Dies kann theoretisch, wie bei einem Parabolspiegel zu Lenkung des Schalls genutzt werden, was aber nur für eine stark gerichtete, punktförmige Schallquelle möglich ist.

4. Abbildung 9 d) – Hyperbelwirkung: wenn $s < r/2$ streuen die Ausgangsstrahlen nach außen. Diese Streuwirkung wird gern verwendet, um den Schall in schwierige Raumpositionen zu lenken. Dies gilt beispielsweise für Auditorien mit Rängen.

²³ Fasold W., Sonntag E., Winkler H., 1987: Seite 266

2.3 Statistische Raumakustik

Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Themenbereichen der wissenschaftlichen Raumakustik, beschreibt eine statistische Betrachtung einen „mittleren Gesamteindruck des Raumes.“²⁴ Genauer wird eine Aussage über akustische Phänomene getroffen, welche überall im Raum mit großer Wahrscheinlichkeit gleich sind. Diese statistischen Größen sind der Nachhall und sein Radius als Verhältnis zum Direkt-schall. Auch der Absorptionsgrad der Wände erfährt hierbei eine Mittelung für den gesamten Raum. Im Punkt 4.1 wird die Nachhallzeit und im Punkt 3.3.1 der Absorptionsgrad ausführlicher betrachtet. Die Beziehung aus Raumvolumen, Absorptionsgrad und Nachhallzeit wurde Ende des 19. Jahrhunderts von Wallace Clement Sabine experimentell erforscht. Die Nachhallzeit T wurde zum ersten Mal von Sabine im Jahr 1898 definiert, ist aber erst 1923 in seinen „Collected Papers On Acoustics“ erschienen und somit die älteste raumakustische Größe. Noch heute wird diese Formel in jeder gängigen Raumsimulation implementiert.

Der Nachhall eines Raumes wird als eines der deutlichsten Charakteristika der Raumakustik wahrgenommen. Jeder Zuhörer wird relativ problemlos einschätzen können, ob ein Raum hallig oder trocken klingt. Eine Aussage jedoch, wie viel Menge an Nachhall sich im Raum befindet und wie lang dieser ausklingt, kann nur durch die rechnerische und letztendlich messtechnische Ermittlung der Nachhallzeit als Gütemaß geschehen.

Die praktischen Vorteile von statistischen Schallfeldberechnungen liegen darin, dass die Gesetzmäßigkeiten unabhängig der Raumposition relativ einfach anzuwenden sind. Jedoch wurde schon bei der Beschreibung der wellentheoretischen Raumakustik deutlich, dass die akustischen Phänomene hinsichtlich verschiedener Raumformen wesentlich komplexer sind, als das diese rein statistisch erfasst werden könnten.

Somit haben alle drei Modellvorstellungen ihre Vor- und Nachteile, was auch für die Verfahren der Computersimulation und eine mögliche Interpretation der Simulationsergebnisse, ungemein wichtig ist.

24 Cremer L., 1978: Seite 145

3 Nutzungskonzept des alten Schafstalls

In diesem Punkt soll kurz auf die Vision zur möglichen Nutzung des alten Schafstalls eingegangen werden. Der alte Schafstall befindet sich in der Gemeinde Großpösna, ca. 12 km südöstlich von Leipzig. Genauer im Innenbereich des ehemaligen Rittergut-areals. Dieses besteht aus drei Gebäudekomplexen, von denen die zwei Anderen bereits saniert wurden. Das ehemalige Herrenhaus dient der Gemeinde als Verwaltungszentrum und im alten Kuhstall befindet sich ein Gastronomiebereich mit einem kleinen Veranstaltungsraum und eine Multifunktionshalle für sportliche Aktivitäten.

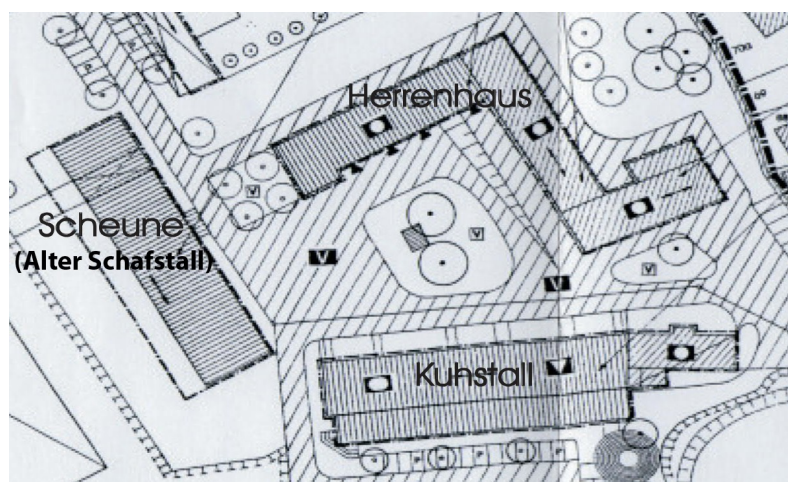


Abbildung 10: Lageplan Rittergut Großpösna

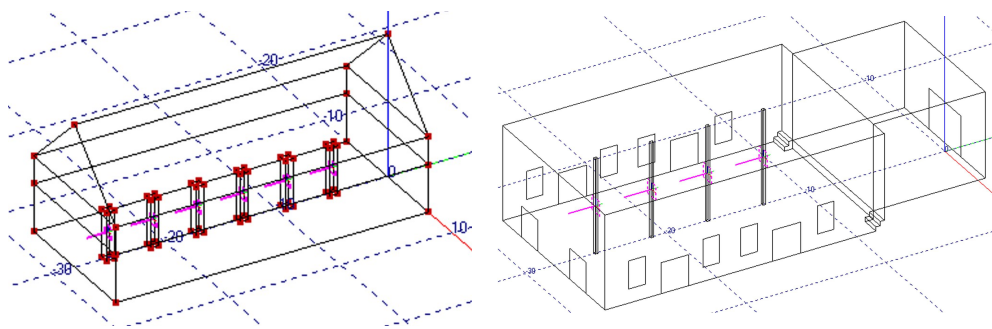
Der alte Schafstall wird derzeit noch von der veterinärmedizinischen Fakultät Leipzig für landwirtschaftliche Zwecke genutzt. Im Verlauf dieser Arbeit sind mehrere Probleme bei der Entwicklung einer Vision aufgetreten. Als Betreiber des möglichen Veranstaltungsortes, tritt das soziokulturelle Zentrum KuHstall e.V. und die Gemeindeverwaltung von Großpösna auf. Bei den ersten Gesprächen zur Erfassung der Baustruktur wurde klar, dass keine Bauzeichnungen, Aufmessungen oder sonstige hilfreiche Daten vorhanden sind. Die Primärstruktur musste dem zur Folge von Hand vermessen werden. Da das Gebäude jedoch von der veterinärmedizinischen Fakultät intensiv genutzt wird, gestaltete sich eine Begehung besonders schwierig. Abbildung 11 zeigt den Außen- und Innenbereich des alten Schafstalls. Die innere Raumstruktur ist nicht offen, sondern in Parzellen für die Tierzucht und die Tierfutterlagerung eingeteilt.



Abbildung 11: Links: Innenbereich mit Säulenstruktur. Rechts oben: Außenansicht. Rechts unten: Innenbereich Dachgeschoss

Der Vorschlag zur Erstellung einer raumakustischen Vision durch ein Simulationsprogramm, wurde vom Verfasser dieser Arbeit ins Gespräch gebracht. Dabei wurde deutlich gemacht, dass eine Simulation immer eine modellhafte Approximation darstellt und die angenommen Bedingungen entscheidend für die Ergebnisse sind. Ein außerordentliches Problem bestand darin, eine Möglichkeit zur längeren Begehung und Aufmessung zu schaffen. Dem Verfasser dieser Arbeit war nicht bewusst, dass die Planung des Veranstaltungsortes konträr zur Planung der veterinärmedizinischen Fakultät verläuft, welche den Nutzraum verständlicherweise behalten möchte. Dies wurde erst relativ spät kommuniziert. Die Aufmessung, unter Erlaubnis der Gemeindeverwaltung und der Universität Leipzig, musste daher an einem einzigen Tag geschehen und als eine ausschließlich wissenschaftliche Maßnahme getarnt werden. Vor Ort waren der Leiter des soziokulturellen Zentrums Herr Peter Krümmel, der Vorstandsvorsitzende Dr. Thomas Fröhlich und als Sachverständiger für Bauwesen, Dipl.-Ing. Matthias Potel. Solange die Nutzungsrechte seitens der Entscheider nicht geklärt werden, sind jedoch weitere Begehungen ausgeschlossen worden.

Die Aufmessung wurde mit Lasermessgerät und klassisch per Maßband sowie Zimmermannswinkel durchgeführt. Abbildung 12 zeigt eine Umgestaltung der unsanierten Primärstruktur in einen Veranstaltungsraum. Durch Herrn Potel als Bau- Sachverständigen wurde darauf hingewiesen, dass die Säulenstruktur durch eine Trägerkonstruktion verkleinert werden könnte. Das Bühnenhaus zeigt neben den Treppen auch die reine Nutzfläche für die Bühne. Links und rechts sind Systembereiche für Verstärker-Racks und Backline eingeplant. Möglicherweise auch zur Positionierung eines Mischplatzes für den Monitor-Mix. Außerdem ist an der Rückwand des Bühnenhauses ein großes Tor zum Ein- und Ausladen eingezeichnet. Die beiden Türen gegenüberliegend, markieren den Zugangsbereich durch die zweite Gebäudehälfte.



*Abbildung 12: Links: Primärstruktur des alten Schafstalls (Gebäudehälfte des Veranstaltungsraumes)
Rechts: Primärstruktur ohne Dachgeschoss einer möglichen Vision. (Mit Bühnenhaus und Verkleinerung der Säulenstruktur durch Stahlträger)*

Im Veranstaltungsraum des alten Schafstalls sollen eine Vielzahl von musikalischen Darbietungen im Bereich Rock, Pop und Jazz stattfinden, bzw. auch reine Sprachdarbietungen. Die Planung einer elektroakustischen Anlage ist Teil der raumakustischen Gegebenheiten und der Grenzbereich zwischen Musik- und Sprachdarbietung immer ein Kompromiss. In der Literatur wird für allgemeine Konzertsäle, mit einem Volumen größer als 1000 m^3 , eine möglichst frequenzunabhängige Nachhallzeit von $T = 1,3$ Sekunden angestrebt (Punkt 5.1). Wenn dies nicht möglich ist, sollte eine äquivalente Schallabsorptionsfläche von $A = 0,1$ nicht unterschritten werden. Weiterhin sollten die Absorptionsflächen gleichmäßig im Raum verteilt werden und als Streuflächen wirken.²⁵

²⁵ Ahnert W., Goertz A., 2008: Seite 503

Eine generelle Grenze für den Deutlichkeitsverlust von Sprache und Klarheitsverlust von Musik, wird bei einem Störpegel von 85 dB (A) und Nachhallzeiten von mehr als 3 Sekunden angesehen²⁶ Hinsichtlich einer getrennten Simulation von Beschallungsanlagen und der Raumakustik, schreiben Ahnert und Goertz: „Nur der Gesamteindruck zählt, der Besucher wird die raum- und elektroakustischen Einflüsse nicht getrennt beurteilen. Somit muss der Planer einer Beschallungsanlage, die im Saal oder auf einer Freifläche herrschenden raumakustischen Gegebenheiten kennen, wenn die Planung erfolgreich sein soll.“²⁷ Die Gütekriterien der Raumakustik werden im Punkt 5 diskutiert.

3.1 Anforderungsprofil der Beschallungsanlage

Die allgemein wichtigsten Werte für eine Beschallungsanlage sind der Frequenzgang, der Schalldruck und die Verzerrungswerte. Bei modernen System liegt das Hauptaugenmerk nicht mehr primär auf dem hohen Kennschalldruckpegel, sondern vielmehr in Richtung einer optimalen Planung des Abstrahlverhaltens. Innerhalb dieser Arbeit müssen daher relativ allgemein gültige Regeln aufgestellt werden. Jeder Hersteller benutzt eigene Herangehensweisen und jedes Wandlerprinzip hat, entsprechend der Bauform, sowohl Vor- als auch Nachteile. Die Diskussion über einen sinnvollen Einsatz von Line-Arrays oder klassische Lautsprecher als Cluster, wurden in der Fachliteratur bereits ausgiebig diskutiert. Ohne nennenswerte Referenz. Entscheidend ist letztlich das erstellte Profil. Dabei geht nicht nur um Leistungswerte, wie ein gleichmäßiger Frequenzgang von 20 Hz bis 20 kHz, sondern auch um sekundäre Kriterien. Servicefreundlichkeit, Zumietbarkeit und Riderfestigkeit müssen ebenfalls beachtet werden. Außerdem wird kein Planer die Entscheidung zum Kauf einer bestimmten, hochpreisigen PA- Anlage anhand von Simulationsdaten treffen.

Signale	Frequenzgang	Schalldruck (bei Hörnern) 0 – 50 ms	Verzerrungen	Sprachverständlichkeit (STI)
Sprach- Beschallung	100 Hz bis 10 kHz	75 dB – 105 dB	unter 10 %	0,5 – 0,7
Musik- Beschallung	20 Hz bis 20 kHz	85 dB – 105 dB	unter 10 %	-

Tabelle 1: Anforderungsprofile von Beschallungsanlagen²⁸

²⁶ Edb.: Seite 485

²⁷ Ebd.: Seite 501

²⁸ Edb.: Seite 497

4 Verfahren der Computersimulation

In diesem Punkt soll nicht im Detail auf den kompletten Funktionsumfang der Computersimulationstechnik eingegangen werden. Vielmehr geht es um die Übertragung der Erkenntnisse aus den Grundlagen der Raumakustik in das mathematische Modell, was zum Verständnis der möglichen Ergebnisse beitragen soll. Die in den vorangegangenen Punkten beschriebenen Grenzen der jeweiligen akustischen Modellvorstellung, gelten allgemein auch für die Computersimulation. Diese stehen also immer im Zusammenhang von der Wellenlänge des Schalls zu den Linearabmessungen der Begrenzungsflächen. Eine wichtige Grenze wird von der Schröder- bzw. Großraumfrequenz beschrieben. Sie markiert den Übergangsbereich von wellentheoretischen Modellen zu geometrischer bzw. statistischer Berechnung in der Simulationstechnik. Wie im Punkt 2.1 beschrieben, liegt der Grund in der Dichte der Resonanzen. Oberhalb dieser Grenze wird die Überlagerung der Resonanzen so groß, dass diese nicht mehr störend auffallen. Die Raumgröße ist also schon ein entscheidender Faktor für die Bestimmung dieses Übergangsbereichs. In der Fachsprache wird der betrachtete Raum unterhalb der Schröder- Frequenz als „akustisch klein“ beschrieben. Genauer betrifft dies wichtige akustische Eigenschaften des Schalls wie Beugung, Diffusität und Interferenz.

$$f_s \approx 2000 \sqrt{\frac{T}{V}} \quad \text{Gl.4-1}$$

f_s : Schröder- Frequenz in Hz

T : Nachhallzeit nach Sabine in s

V : Raumvolumen in m³

Da die Algorithmen von EASE 4.4 größtenteils auf geometrischen Beschreibungen beruhen, ist die Konstruktion der Wellenfront als Strahl für Frequenzen oberhalb der Schröder- Frequenz durchaus legitim. In Verbindung mit der statistischen Raumakustik werden allgemein relativ brauchbare Ergebnisse erzielt.

Bezüglich absoluter physikalischer Korrektheit schreibt Vorländer: „But absolute physical correctness is not always a reasonable goal. In most cases, geometrical acoustics offers approximate solutions, solutions which are sufficient in practice.“²⁹

29 Vorländer M., 2008: Seite 213

In den folgenden Punkten soll die Computersimulation am Beispiel des alten Schafstalls in Großpösna erstellt werden. Eine praktische akustische Planung kann nur ziel führend sein, wenn die Parameter der Simulation als Modell auch in die Realität übertragen und verstanden werden. Gerade deshalb soll der Zusammenhang zwischen modellhafter Approximation und einem realen Bezug hergestellt werden.

Neben weiteren bekannten Programmen wie ODEON, CATT und Ulysses, welche alle unterschiedliche Programmstrukturen und Module ausweisen, wird im Rahmen dieser Arbeit auf die aktuelle Version von EASE zurückgegriffen.

4.1 Raumimpulsantwort und Übertragungsfunktion

Im heutigen Kontext der Signal- und Systemtheorie ist ein Signal, eine akustische, elektrische oder elektromagnetische Schwingung. Diese können in einem System übertragen und verändert werden. Im Zusammenhang dieser Arbeit kann das System ein Lautsprecher, Mikrofon, Filter oder der gesamte akustische Raum sein. Entscheidend ist die signalverarbeitende Wirkung und die damit verbunden Grundlagen der Nachrichtenübertragung. Die einfachste Beschreibung besteht in einer Zeitfunktion $s(t)$ als Eingangssignal in das System und der daraus folgenden Systemantwort $g(t)$. In der Simulationstechnik sind akustische Räume in der Regel linear und zeitinvariant (LTI-Systeme). Das heißt, die Systemantwort als Summe zweier Signale ist gleich der Summe der einzelnen Systemantworten. Wird das Eingangssignal zeitlich verschoben, verschiebt sich auch die Systemantwort auf diese Art und Weise. Reale Räume verhalten sich jedoch nicht so. Als Beispiel für eine reale zeitvariante Komponente, wird bei Weinzierl die Schallgeschwindigkeit in der Luft genannt, welche sich bei tagesabhängiger Temperaturänderung im Raum ebenfalls ändert.³⁰ Eine Schwingung wird in einem LTI System nur in Amplitude und Phase verschoben. Für eine harmonische Schwingung in komplexer Schreibweise, wird die Phasenverschiebung der Systemantwort $g(t)$ mit dem komplexen Skalierungsfaktor H angegeben.

$$s(t) = e^{j\omega t} \Rightarrow g(t) = He^{j\omega t} \quad \text{Gl.4.1-1}$$

³⁰ Vgl. Weinzierl S., 2008: Seite 16

Eine Annäherung an die Zeitfunktion $s(t)$ erfolgt mit der Rechteckfunktion $d(t)$.

$$s(t) \approx s_A(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT_0) d(t-nT_0) T_0 \quad \text{Gl.4.1-2}$$

T_0 : Breite des Rechtecks

$1/T_0$: Höhe des Rechtecks

$d(t-nT_0)T_0$: um nT_0 verschobenes Rechteck

$s(nT_0)$: $s(t)$ an der Stelle nT_0 als Amplitudengewichtung des verschobenen Rechteck

Mit der Summe der einzelnen einzelnen Rechtecke der Näherung $s_A(t)$ folgt in einem LTI- System die Systemantwort $g_A(t)$.

$$g(t) \approx g_A(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} s(nT_0) g_d(t-nT_0) T_0 \quad \text{Gl.4.1-3}$$

Wird die Rechteckfunktion $d(t)$ durch einen Dirac- Stoß ersetzt, folgt aus der Rechteckantwort $g_d(t)$ wird die Sprung- bzw. Impulsantwort $h(t)$. Der Dirac- Stoß $\delta(t)$ ist ein mathematisch idealer Impuls, der unendlich schmal und unendlich hoch wird und als Produkt die endliche Fläche 1 behält. Denn je schmaler die Rechtecke werden, desto genauer wird die Approximation. Wird das Eingangssignal $s(t)$ an diese Dirac- Funktion angenähert, so wird nT_0 zu τ und T_0 zu $d\tau$. Die Summe wird zum Integral und die Ausgangsfunktion zu Gleichung 3.1-4 als Faltungsintegral. Die Impulsantwort beschreibt dabei das LTI System vollständig, da sich jede Funktion durch eine unendliche Folge von Dirac- Impulse annähern lässt.

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) \delta(t-\tau) d\tau \quad \text{Gl.4.1-4}$$

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tau) h(t-\tau) d\tau \quad \text{Gl.4.1-5}$$

Das Ausgangssignal $g(t)$ eines LTI Systems, wird also durch die Faltung des Eingangssignals $s(t)$ mit der Impulsantwort $h(t)$ gebildet. Dabei wird h an der Zeitachse ($t-\tau$) gespiegelt, s mit h multipliziert und mit $s(\tau)$ gegeneinander verschoben bzw. gewichtet. Dadurch entsteht für jeden Zeitpunkt t ein anderer gewichteter Mittelwert.

$$g(t) = s(t) * h(t) \quad \text{Gl.4.1-6}$$

In der heutigen digitalen Signalverarbeitung geschieht die Faltungsoperation sogar in Echtzeit. Fast alle digitalen Audioworkstations beinhalten mittlerweile moderne Hall-Programme als Plug-in, mit denen vielfältige Impulsantworten zur Hallerzeugung benutzt werden können. Auch die Auralisation einer akustischen Computersimulation, basiert grundlegend auf Faltung eines Eingangssignals mit der Impulsantwort des modellierten Raumes. Für die Faltungsoperation auf digitalen Ebene, wird durch die zeitdiskrete Dirac-Funktion $\delta(n)$ als einzelnes Sample, das Faltungsintegral zur zeitdiskreten Faltung.

Durch die Fourier-Transformation, wird aus der Impulsantwort $h(t)$ als Zeitfunktion, die Übertragungsfunktion $H(f)$ als Funktion der Frequenz ermittelt.

4.2 Erstellung der Primärstruktur

Mit *Room Edit* wird die grundlegende Raumgeometrie durch numerische und graphische Eingaben festgelegt. Strukturen oberhalb von 5-10 cm spielen dabei keine Rolle, da nur Frequenzbereiche bis 10 kHz wichtig sind. In der Praxis ist für sehr kleine Wellenlängen kein Raum wirklich gleichmäßig und es werden selbst akustisch nicht relevante Details in die Berechnung übernommen, was die Komplexität der Berechnung drastisch erhöht. Der Import von architektonischen bzw. bautechnischen 3D Zeichnungen (DWG- oder DXF Dateien) ist oftmals kontraproduktiv, denn diese sind meist mit all ihren Details zu komplex. Daher ist es sinnvoll die 3D Zeichnung direkt im Simulationsprogramm vereinfacht zu erstellen. Für viele Anwendungen in EASE ist es wichtig, dass das gesamte Raummodell geschlossen gezeichnet wird, da sonst die Werte der Gesamtoberfläche und des Raumvolumens nicht berechnet werden können.³¹

Abbildung 10 zeigt ein erstes einfaches Testmodell des alten Schafstalls in Großpösna, im derzeitigen Zustand. Gezeichnet wurde jedoch nur eine symmetrische Hälfte des gesamten Gebäudes, da diese Aufteilung vorrangig als Veranstaltungsort geplant ist. Bei der Zeichnung handelt es sich um die erste Aufmessung, welche vor Ort per Lasermessgerät durchgeführt wurde. Die Koordinatenachsen zeigen die Längenverhältnisse in Metern. Durch die Funktion *Standard Rendering* wird das Modul *Eyes* geöffnet und somit die Möglichkeit geschaffen, sich den Raum in der gewählten Farbgebung der Materialien anzusehen. Das Modul *Vision* zeigt eine noch detailreiche, architektonische Ansicht, wenn beispielsweise Fensterbereiche und Lampen gerendert werden.

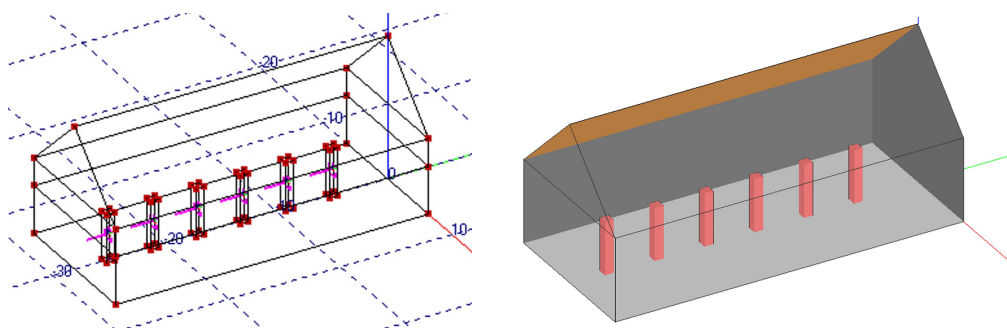


Abbildung 13: links: Drahtgittermodell der Primärstruktur. Rechts: Beschreibung der Wandmaterialien
(braun: Holzpaneele, hellgrau: Glattbeton, dunkelgrau: Rauputz, rot: Wandziegel)

³¹ Vgl. Vorländer M., 2008: Seite 177

Die Erstellung von Flächen erfolgt in einfachster Weise durch numerische Eingabe von Punkten in das Koordinatensystem. Nach einer beliebigen Verbindung dieser Punkte zu einer Fläche, muss die Reflexionswirkung dieser überprüft werden. Eine gelbe Markierung zeigt bei der ausgewählten Fläche immer die Reflexionsseite an, welche durch den Befehl *invert face* gedreht werden kann. Ebenen mit doppelseitiger Reflexion sind orange und hellblau gefärbt.

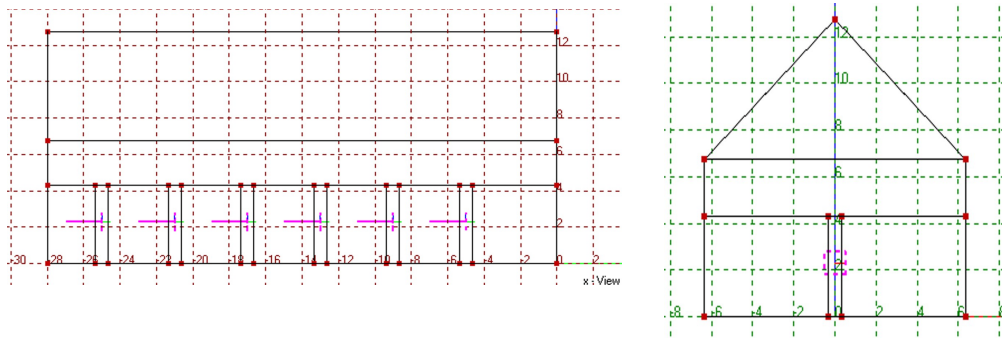


Abbildung 14: 2D- Schnitt des alten Schafstalls aus der Perspektive der x- und y- Achse

Aus den Daten der Primärstruktur kann leicht das komplette Volumen des Nutzraumes errechnet werden. Das Volumen des Raumes nach Abbildung 11 beträgt, inklusive des Dachgeschosses, ca. 3451 m³. Wird die Raumform als klassischer Schuhkarton ohne Dachgeschoss genutzt, reduziert sich das Volumen auf knapp 2397 m³.

Aus dem Grundriss ergibt sich eine Fläche von ca. 356 m². Schon Anhand dieser Daten kann eine grobe Abschätzung bezüglich der maximalen Personendichte pro m², mit Hilfe der Versammlungsstättenverordnung erfolgen.³² Wobei dieser Wert nichts darüber aussagt, wie viele Personen eine bestimmte Fläche aufnehmen könnte, sondern bis zu welchem Wert eine gefahrenfreie Aufnahme von Personen erfolgen kann. Wird von einem ca. 100 m² großen Bühnenbereich ausgegangen, bleibt eine Kapazität im Zuhörerbereich von 256 m². Eine geschätzte maximale Personenanzahl von ca. 450 bis 500 Gästen ist also durchaus realistisch. Da hier die Simulation als erstes Planungswerkzeug beschrieben wird, beinhaltet die bisherige Vision mögliche gastronomische Anlagen und Garderobenräume in der angrenzenden Gebäudehälfte.

32 Praxisleitfaden Versammlungsstättenverordnung, 2007: Seite 21

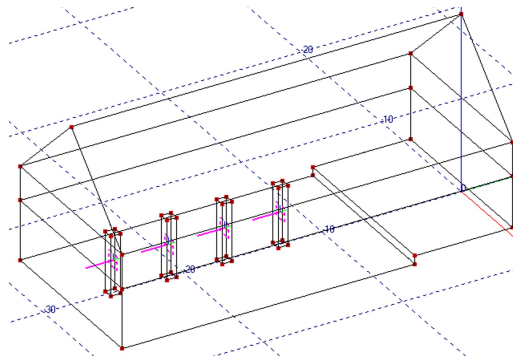


Abbildung 15: Testobjekt des alten Schafstalls mit Bühnenbereich

4.3 Erstellung der Sekundärstruktur

Nach Fertigstellung der Primärstruktur können die Wandmaterialien und somit die Sekundärstruktur festgelegt werden. Hierfür gibt es umfangreiche Wandmaterialdatenbanken. Fußböden können beispielsweise mit Parkett, Wände mit Rauputz und ein Dachgiebel mit Holzmaterialien belegt werden. Auch gibt es die Möglichkeit verschiedene Publikumsflächen einzufügen. Auf diese sogenannten *Seating Areas*, werden für unterschiedliche Besetzungsdichten adäquate Absorptionsdaten eingefügt. Eine schnelle Möglichkeit hierfür bietet die Funktion *coating*, bei der die Grundflächen mit dem Absorptionsgrad eines Publikums „überzogen“ werden. In *Audience Areas* werden Hörerflächen mit bestimmter Ohrenhöhe simuliert.

4.3.1 Absorptionsgrad

In EASE kann für jedes Material in der Datenbank der Absorptionsgrad frequenzabhängig eingesehen werden. Konkrete Absorber wirken nach Ihrer Klassifizierung als Tieff-, Mitten-, Höhen- oder Breitbandabsorber. Unabhängig der physikalischen Wirkungsweise und der Berechnung von Absorbern, ist die Implementierung dieser im Simulationsprogramm EASE ebenfalls nur eine modellhafte Vereinfachung.

In EASE wird nicht der Einsatz eines Platten- oder Helmholz- Resonators an einer bestimmten Position simuliert. Entscheidend ist allein der gewählte Absorptionsgrad für einen bestimmten Frequenzbereich, welchen der Anwender einer Fläche schlicht aufprägt. Dadurch geht die grundlegende Erstellung der Sekundärstruktur relativ einfach von der Hand. Nichtsdestotrotz muss sich der Anwender über die physikalischen Prozesse von Absorbern und Reflektoren für eine praktische Umsetzung im Klaren sein.

Neben der Primärstruktur ist die Absorption im Raum ein maßgeblicher Bestandteil der wissenschaftlichen Akustik und für die Bildung der Nachhallgesetze (Punkt 4.1) von entscheidender Bedeutung.³³

Auch in Simulationsprogrammen sind nicht nur die Ausbreitungswege des Schalls wichtig, sondern auch die Energieabnahme. Der Reflexionsgrad ρ einer Oberfläche ist das Verhältnis von reflektierter zu auftreffender Energie mit E_R/E_0 .

$$\alpha = 1 - \rho = 1 - \frac{E_R}{E_0} \quad \text{Gl.4.3-1}$$

Der Absorptionsgrad ist das Maß die für vom Material absorbierte Schallenergie. Dabei wird zwischen „verlorengegangener“ Schallenergie als Dissipationsgrad δ und „durchgelassener“ Schallintensität als Transmissionsgrad τ unterschieden. Ein idealer Absorber ($\alpha = 1$) absorbiert 100 % der Schallenergie, während eine komplett schallharte Wand ($\alpha = 0$), als idealer Reflektor wirkt.

$$\alpha = \delta + \tau ; (0 < \alpha < 1) \quad \text{Gl.4.3-2}$$

Die Transmission des Schalls in die Umgebung des Raumes ist für vor allem für die bauakustische Dämmung von Bedeutung und findet Einfluss im Schalldämmmaß. Die Dissipation beschreibt im akustischen Sinne die Umwandlung der Schallenergie in Wärmeenergie, maßgeblich durch die Reibung des Schallfeldes an einer porösen Oberfläche und als frequenzabhängige Dämpfung des Schalls in der Luft. Die Luftdämpfungskonstante m kann in allen Simulationsprogrammen, in Abhängigkeit der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, angegeben werden. Im ArrayCalc von d&b liegt die Standardeinstellung der Luftdämpfungskonstante bei 20°C und 60% Luftfeuchtigkeit. Tabelle 1 zeigt die Dissipation für die Oktavband- Mittenfrequenzen.

³³ Eine umfangreiche Abhandlung über die Verfeinerung der Nachhalltheorie bis hin zur wellentheoretischen Betrachtung des Nachhalls ist in „Die Wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik“ von Lothar Cremer zu finden.

relative Luftfeuchtigkeit	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
40 %	0,60	1,07	2,58	8,40	30,00
60 %	0,64	1,11	2,14	5,91	20,52

Tabelle 2: frequenzabhängige Luftdämpfungskonstante m bei 20°C und 1013 hPa
(Multiplikation der Werte mit 10^3 für Meter⁻¹)

Sind alle Absorptionsgrade des Raums bekannt, kann die gesamte äquivalente Absorptionsfläche des Raumes A_{ges} berechnet werden. Die äquivalente Absorptionsfläche A_{ges} beschreibt im Sinne der statistischen Raumakustik nicht den Ort und die Verteilung der einzelnen Wandflächen.³⁴ A_{ges} setzt sich aus n verschiedenen Teilflächen S_k und den jeweiligen Absorptionsgraden α_k zusammen.

$$A_{ges} = \sum_{k=1}^n \alpha_k S_k \quad \text{Gl. 4.3-3}$$

Durch die örtliche Mittlung des Absorptionsgrades $\bar{\alpha}$, können die gesamten Materialeigenschaften eines Raum in einer Zahl verallgemeinert werden, wenn der Quotient aus äquivalenter Absorptionsfläche und Gesamtoberfläche gebildet wird.

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum \alpha_k S_k}{\sum S_k} \quad \text{Gl. 4.3-4}$$

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Schallabsorption des Publikums, welche von unheimlich vielen Variablen anhängig ist. Für eine reale Bemessung der Publikumsabsorption sind Form und Dichte der Besetzung, Kleidungsart, Bestuhlungsmaterial, sowie Sitz- und Reihenabstand entscheidend. Abbildung 15 zeigt den ersten Entwurf zweier bestuhlter Publikumsflächen im alten Schafstall, durch die Funktion *Coating*. Die grünen Flächen kennzeichnen die *Audience Area* mit einer gewählten Ohrhöhe von 1,20 m.

³⁴ Vgl. Cremer L., 1978: Seite 159

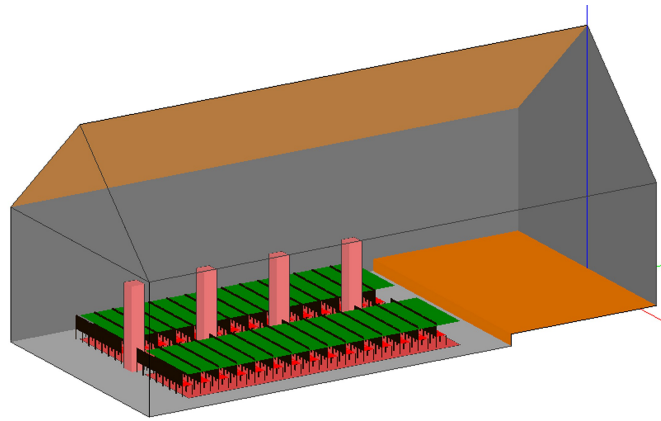


Abbildung 16: Modellierung der Publikumsflächen im alten Schafstall mit Holzstühlen.

Abbildung 16 präzisiert die äquivalente Schallabsorptionsfläche pro Person für unterschiedliche Besetzungsdichten. Bei Ahnert und Tennhardt wird darauf hingewiesen, dass gerade hinsichtlich der mittleren und hohen Frequenzen die Unsicherheiten bei der akustischen Planung bzw. Simulation sehr groß werden, je nachdem welche Besetzungsdichte angenommen wird.³⁵

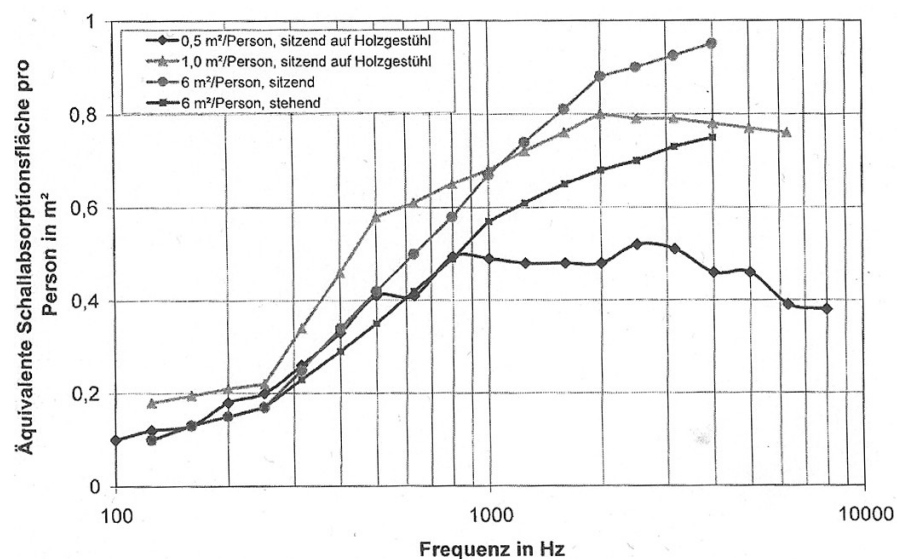


Abbildung 17: Äquivalente Schallabsorptionsfläche von Publikum in m² pro Person im diffusen Schallfeld³⁶

³⁵ Vgl. Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008, Seite 239

³⁶ ebd., Seite 239

Bei der Bewertung des Absorptionsgrades in der Computersimulation gilt es folgendes zu beachten. Die Materialdaten werden prinzipiell bei diffusem Schalleinfall in Hallräumen gemessen.³⁷ Der Absorptionsgrad ist jedoch abhängig vom Schalleinfallswinkel ϑ , was durch Absorptionsgradmessungen nachgewiesen wurde.³⁸ Winkelabhängige Daten sind zu bevorzugen, stehen aber nicht jedem Programm zu Verfügung.

Ohne wellenakustische Algorithmen können besonders tiefe Absorptionsgrade, unterhalb der Schröder- Frequenz, nicht korrekt beschrieben werden. Für den Planer ist also wichtig, diese Grenzbedingungen für die Erstellung der Sekundärstruktur zu beachten.

Geht es beispielsweise um die Dämpfung von Raumresonanzen, werden in der Praxis Helmholtz- und Plattenresonatoren eingesetzt. Beide Prinzipien wirken als Feder-Masse- System. Eine platzsparende Alternative ist der Membranabsorber, mit einer Kombination aus beiden Varianten.³⁹

Abbildung 14 zeigt den Absorptionsgrad eines Platten- Resonators als Holzfaserplatte aus der EASE Datenbank. Die Platte wird als Masse zum Schwingen angeregt und die Steifigkeit der Luft mit der Biegefestigkeit der Platte wirken als Feder. Die entzieht der Schwingung Energie. Eine Berechnung der Grenzfrequenz kann näherungsweise durch die Dicke der Luftschicht und die flächenbezogene Masse der Platte erfolgen.

$$f_R \approx \frac{60}{\sqrt{m \cdot d_L}} \quad \text{Gl.4.3-5}$$

f_R : Grenzfrequenz eines Platten- Resonators in Hz

m : flächenbezogene Masse der schwingenden Platte in kg/m^2

d_L : Dicke des Luftpolster in m

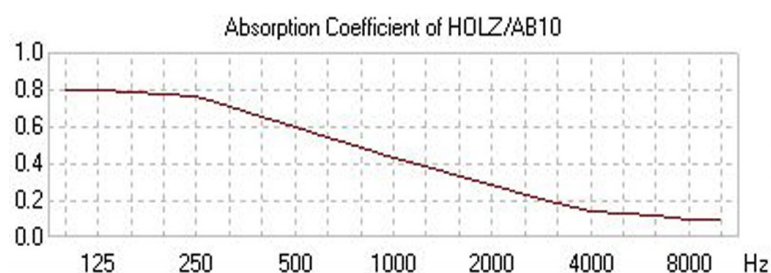


Abbildung 18: frequenzabhängiger Absorptionskoeffizient einer Holzfaserplatte mit 10 cm Luftpolster vor einer starren Wand

³⁷ Vgl. Vorländer M., 2008: Seite 180

³⁸ Vgl. Cremer L., 1978: Seite 113

³⁹ Vgl. Fuchs H.V., Hunecke J.: Einsatz von Membran-Absorbern in der Raumakustik

Für die Umwandlung von Schall- in Wärmeenergie sind wichtige Größen die Porosität, mit dem Verhältnis aus Luft- und Gesamtvolumen des Absorbers und der Strukturfaktor, bei welchem Kompressions- – und Strömungsvorgänge angegeben werden. Besonders wichtig ist der spezifische Strömungswiderstand R_s ⁴⁰

$$R_s = \frac{\Delta p \cdot A}{q_v} \quad \text{Gl.4.3-6}$$

R_s : spezifischer Strömungswiderstand in Pasm^{-1}

A : Querschnittfläche der Materialprobe senkrecht zur Durchströmungsrichtung in m^2

Δp : Druckdifferenz vor und hinter dem Material gegenüber dem Atmosphärendruck in Pa

q_v : durch das Material hindurchtretender Volumenstrom in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$

Gleichung 3.3-7 verdeutlicht zudem die Abhängigkeit der Dämmstoffdicke d von einer gewünschten frequenzabhängigen Absorption. Soll die Mineralfaserplatte der EASE Datenbank nach Abbildung 13 auch bei 125 Hz einen Absorptionsgrad $\geq 0,8$ erzielen, müsste die Dämmstoffdicke 0,32 m betragen. Eine tieffrequente Absorption ist ohne Raumverlust auf diese Art und Weise nur schwer möglich und auch nicht sinnvoll.

$$d = \frac{40}{f} \quad \text{Gl.4.3-7}$$

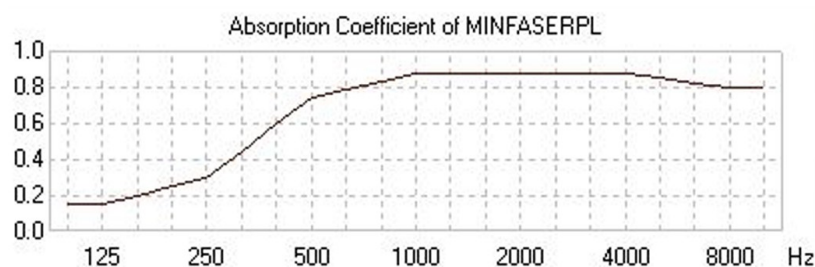


Abbildung 19: frequenzabhängiger Absorptionskoeffizient einer Mineralfaserplatte mit $d = 4\text{cm}$

40 Vgl. Cremer L., 1978: Seite 280

4.3.2 Streugrad s

Die Schallstreuung wird entweder mit dem frequenzabhängigen Diffusitätsgrad d oder dem frequenzabhängigen Streugrad s angegeben. Letzterer ist durch das Verhältnis der gesamten reflektierten Schallenergie zur diffus reflektierten Schallenergie nach ISO 17497-1 definiert.⁴¹ In EASE wird der Streugrad in den Materialdatenbanken als *Scattering Coefficient* bezeichnet. In dem Modul AURA Mapping kann der Streugrad als Berechnungsfaktor durch die Funktion *add 5% scattering* erzeugt werden, wenn die Diffusionswerte der Materialien unbekannt sind. Dies ist gerade für die Simulation diffuser Reflexionen anhand der Strahlenverfolgungsmethode (Ray Tracing) entscheidend.

4.4 Simulation von Beschallungsanlagen

Das Simulationsprogramm EASE ist hinsichtlich der Beschallungstechnik ein sehr weit verbreitetes Werkzeug, da viele Lautsprecher-Hersteller Ihre Daten aus modernen Impulsantwortmessungen liefern. Grundlegend wird zwischen einfachen Punktstrahlern, zusammengesetzten Punktstrahler als Cluster, Line Arrays und gemischten Lautsprecheranordnungen unterschieden. Mit Polardiagrammen und Isobarenkurven lässt sich das räumliche Abstrahlverhalten (Directivity) eines Lautsprechers betrachten. Isobaren sind Kurven gleichen Schalldrucks.

Dabei geben die Hersteller die frequenzabhängigen vertikalen und horizontalen Öffnungswinkel an, bei welchen der Schalldruck um -6 dB und -12 dB gegenüber der Mittelachse abfällt. Anhang 1 zeigt die Isobaren für den d+b Q1 als 2-Wege- Line- Array Lautsprecher. Die Datenbasis für moderne Simulationsprogramme liefern jedoch Ballon-Daten, welche die Schallfeldverteilung und Richtcharakteristik auf ein dreidimensionales Kugelrasternetz übertragen. Die Festlegung der akustischen Zentrums eines Lautsprechers, als Nullpunkt der Koordinatenachsen, ist dabei vor allem für Mehr-Wege-Systeme nicht klar definiert.⁴² Bei rein coaxialen Anordnungen der Lautsprecherwege, ist die Festlegung als Punktschallquelle hingegen eindeutiger. Um den akustischen Mittelpunkt, wird bei jedem festgelegten Rasterpunkt die Impulsantwort gemessen, meist für Winkelauflösung von 1° bis 10° , bei einem Frequenzbereich von 1/36 Oktave bis einer Oktave.

41 www.iso.org

42 Goertz A., 2008: Seite 486

EASE nutzt diese Ballon Daten mit Annahme des Lautsprechers als Punktschallquelle. Die Berechnung des Direktschallpegels erfolgt für ein einzelne Punkte der festgelegten Hörfläche für eine bestimmte Frequenz. Durch Angaben des Kennschalldruckpegels (Sensitivity), der Richtcharakteristik und der maximalen elektrischen Leistung.

Dabei ist zu beachten, dass sich Kennschalldruck immer auf die Nennimpedanz eines Lautsprechers bezieht, wobei sich die Impedanz mit der Frequenz ändert.⁴³ In der klassischen Darstellungsform werden die genormten Oktavband- Mitten- Frequenzen angegeben.

$$L_{dir} = L_K + 10 \log(P_{el}) \text{ dB} - 20 \log(r_{LH}) \text{ dB} + 20 \log(\Gamma(\vartheta, f)) \text{ dB} \quad \text{Gl.4.4-1}$$

L_{dir} : Direktschallpegel

L_K : Sensitivity (1W/1m) in dB bezogen auf die Nennimpedanz des Lautsprechers

P_{el} : maximale Leistung

r_{LH} : Abstand zwischen Lautsprecher und Hörer

$\Gamma(\vartheta, f)$: Richtcharakteristik in Abhängigkeit vom Winkel und von der Frequenz

Die Grundlage hierfür bildet das Abstandsgesetz für Punktstrahler. Die Punktschallquelle strahlt dabei idealisiert in alle Richtungen gleichmäßig und erzeugt ein Schallfeld als Kugelwelle. Eine sphärische Abstrahlung bedeutet, dass sich Punkte gleicher Phase und Amplitude auf der Kugeloberfläche befinden, mit der Schallquelle als Mittelpunkt. Die Berechnungsformel der Kugeloberfläche in Beziehung zur akustischen Leistung P_{ak} , ergibt die Schallintensität als Funktion des Abstandes $I_K(r)$. Durch den quadratischen Einfluss des Radius r , wird die Mantelfläche bei Abstandverdopplung vervierfacht. Damit verteilt sich die Schallenergie auf die vierfache Fläche. Die Schlussfolgerung ist das bekannte reziproke Quadratgesetz der Schallintensitätsabnahme mit dem Faktor $1/r^2$. In logarithmischer Umrechnung eine Abnahme des Schallintensitätspegels pro Abstandsverdopplung um -6 dB.

$$I_K(r) = \frac{P_{ak}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \quad \text{Gl.4.4-2}$$

Mit der akustischen Leistung P_{ak} aus dem Skalarprodukt eines Schallintensitätsvektors und dem Flächenvektor.

43 www.sengpielaudio.de: Lautsprecher -Impedanzkurven

$$P_{ak} = \int \vec{I} \cdot d\vec{A} \quad \text{Gl.4.4-3}$$

Mit der Beziehung aus Schallintensität und Schalldruck, welcher mit $1/r$ abnimmt.

$$I \sim p^2 \sim \frac{1}{r^2} \quad p \sim \frac{1}{r} \quad \text{Gl.4.4-4}$$

Im Gegensatz dazu wird das theoretische Modell eines Line Arrays als Linienquelle verstanden, welche eine Zylinderwelle emittiert (Abbildung 17).

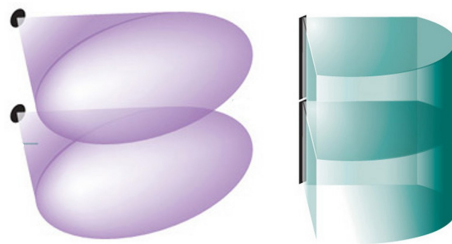


Abbildung 20: links: Kugelwelle, rechts: Zylinderwelle⁴⁴

In der Praxis funktioniert kein Line Array als perfekter Linienstrahler. Die Bildung einer Wellenfront durch entsprechend geformte Elementarwellen, unterliegt vielen Einschränkungen und Faktoren. Der Quellenabstand, die Länge der Aufreihung und die betrachtete Wellenlänge sind ebenso entscheidend wie der Betrachtungsabstand. Nichtsdestotrotz kann sich hier zur besseren Erklärung ein Bändchenhochtöner vorgestellt werden, welcher mittlerweile auch Einzug in der professionellen Beschallungstechnik gefunden hat. Durch Konstruktion der Membran als langer schmaler Streifen, strahlt dieser eine nahezu perfekte Zylinderwelle in der Membranlänge ab. Die Schallwellen dehnen sich also senkrecht zur Linie aus, wodurch Punkte gleicher Phase und Amplitude auf konzentrischen Kreisen liegen. Durch die Mantelfläche des Zylinders ergibt sich eine lineare Schallintensitätsabnahme um den Faktor $1/r$ pro Abstandsverdopplung (Gl. 4.4-5). In Umrechnung als Abnahme des Schallintensitätspegels um -3 dB pro Abstandsverdopplung .

$$I_z(r) = \frac{P_{ak}}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l} \quad \text{Gl.4.4-5}$$

Die raumakustische Simulation von Beschallungsanlagen ist ebenfalls als modellhafte Approximation anzusehen und unterliegt, je nach Programm, einer Vielzahl von Einschränkungen. In der Basisfunktion geht EASE immer von akustischen Quellen mit sphärischer Wellenfront und entfernungsunabhängiger Richtcharakteristik aus. Jeder erstellte Cluster wird als eine Punktschallquelle betrachtet und hat nur im Fernfeld Gültigkeit.⁴⁵ Werden Lautsprecher-Konfigurationen als Array Objekt gespeichert, kann sowohl der Fernfeld- als auch der Nahfeld-Richtungsballon ermittelt werden. Jeder Lautsprecher wird dann als einzelne Schallquelle betrachtet, was jedoch auch die Rechenzeit für eine simulierte Schallausbreitung erhöht. Die Möglichkeit zur Array Kalkulation gilt aber in EASE nicht für Linienquellen. Im Nahfeld verhält sich das Line Array wie eine idealisierte Linienquelle. Der Übergang vom Nahfeld, mit der Abnahme des Schallintensitätspegels um -3 dB pro Abstandverdopplung, zum Fernfeld mit -6 dB pro Entfernungsverdopplung, kann durch folgende Formel angenähert werden.

$$r_{\text{ÜB}} \approx \frac{l^2 \cdot f}{2c} \quad \text{Gl.4.4-6}$$

l : Länge der Linie / bei Direktstrahlern der Membrandurchmesser in m

f : Frequenz in Hz

c : Schallgeschwindigkeit in ms^{-1}

Das ausgedehnte Nahfeld beträgt also für ein 2,5 m langes Line Array bei 4 kHz schon ca. 36,5 m. Bei einem 5 m langem Line Array schon ganze 146 m. Eine normale Messung von Ballon Daten würde unter diesen Bedingungen für das Fernfeld nicht möglich sein, da sich das Nahfeldverhalten mit der Frequenz und dem Betrachtungsabstand ständig ändert. Für normale Lautsprecherabmessungen sind die Fernfeldbedingungen, bei einem üblichen Messabstand von 4m, bereits hinreichend erfüllt. Unabhängig davon gibt es in der Literatur unterschiedliche Betrachtungsweisen wie der Nahfeld- Fernfeld- Übergang zu definieren ist.⁴⁶ Für den Öffnungswinkel des Hauptmaximums ab dem Fernfeld- Übergang gilt folgende Formel.

$$BW_{-6\text{dB}} = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{1,9 \cdot \lambda}{l \cdot \pi} \right) \quad \text{Gl.4.4-7}$$

$BW_{-6\text{dB}}$: Öffnungswinkel mit -6 dB Schalldruckpegel gegenüber der Mittelachse

l : Länge der Linie

⁴⁵ EASE Tutorial - Deutsch – Speaker Base Modul: Seite 135

⁴⁶ Vgl. Urban, Heil, Baumann, AES Convention Paper, 2001: Seite 2

Für den Summenschalldruck durch mehrere Quellen für einen Hörpunkt, wird in Simulationsprogrammen außerdem eine energetische Addition nach Betrag und Phase für eine bestimmte Frequenz vorgenommen (Gl. 4.4-8). Alle Mappings wurden daher für die Oktav- Mitten- Frequenzen durchgeführt. Eine Addition ohne phasenrichtigen Einfluss wäre nur für dezentrale Beschallungskonzepte geeignet, wie elektroakustische Anlagen (ELA) mit 100 V- Technik.

$$A_{ges} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(\omega_i t)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n A_i \cdot \sin(\omega_i t)\right)^2} \quad \text{Gl.4.4-8}$$

Der Unterschied des Abstrahlverhaltens von Line Arrays zu Clustern mit konventionellen Lautsprechern besteht also im frequenzabhängigen Kopplungsverhalten und der Möglichkeiten zur Vermeidung von destruktiver Interferenz. Diese entstehen durch die Phasendifferenzen der Schallwellen verschiedener Quellen am Beobachtungspunkt. Die Erzeugung einer gewollten phasen- und amplitudengleichen Kopplung ist vom Quellenabstand und daher von der Frequenz abhängig. Prinzipiell muss dieser Abstand d_{max} , kleiner sein als die Hälfte der kleinsten betrachteten Wellenlänge, was letztendlich besonders für den Hochtonbereich interessant ist. Bei 16 kHz, mit einer Wellenlänge von ca. 22 mm, müsste dem zur Folge ein unrealistischer Quellen- bzw. Treiberabstand von 10 mm eingehalten werden.

$$d_{max} < \frac{\lambda_{min}}{2} \quad \text{Gl.4.4-9}$$

Für eine kohärente Wellenfront im Hochtonbereich setzen die Hersteller auf verschiedene Treiber- bzw. Schallführungskonzepte. Dies können Wavesguides, parabolische Reflektoren oder Bändchenhohtöner sein. Konventionelle Lautsprecher als Cluster nutzen im Hochtonbereich ausschließlich stark bündelnde Hörner, welche dann in der engen Hauptabstrahlrichtung einen hohen Kennschalldruckpegel liefern und erst für tiefere Frequenzen eine Kopplung erzielen. Die Vor- und Nachteile der Treiberkonzepte werden in der Fachliteratur bereits ausgiebig diskutiert und können nur durch die Einschätzung und Erfahrung des Anwenders eingebracht werden. Bezüglich der Pegelverteilung auf der Hörfläche muss jedoch generell die Abstrahlcharakteristik des Line Arrays, mit den Zwischenwinkeln der Elemente (Curving), die Ausrichtung des gesamten Arrays und die Länge des Arrays im Zusammenhang betrachtet werden.

Das Curving hängt maßgeblich von der vertikalen Ausdehnung der Array- Elemente ab. Abstimmungsverhältnisse hinsichtlich Positionierung und Curving, sowie hersteller-spezifische Controller- Setups, sollten daher mit den Systemstools der Hersteller vorgenommen werden.

Das wichtigste Kriterium für die Simulation von Beschallungskonzepten ist die Verteilung des Direktschallpegels, welche möglichst gleichmäßig auf den Hörerbereich eingegrenzt werden sollte. In EASE können Lautsprecher aus der Datenbank an beliebigen Stellen in das Modell eingezeichnet und mit der Funktion *Loudspeaker Aiming* ausgerichtet werden. Abbildung 18 zeigt eine erste visuelle Ausrichtung eines d&b Q7 und die Betrachtung des Direktschallpegels auf der Hörerfläche per *Single Mapping* bei 1 kHz. Zusätzlich wurde die Funktion *Map With Shadows* aktiviert, um die Abschattungseffekte der Säulen im alten Schafstall zu verdeutlichen. Da EASE keine Beugungseffekte simulieren kann, würden die schwarzen Bereiche der totalen Abschattung selbst bei 125 Hz angezeigt werden. Schon dieser einfache Test verdeutlicht eines der größten Probleme der Raumstruktur des alten Schafstalls. Die Säulen in der Mitte des Raumes, mit einer Seitenlänge von 0,70 m, machen eine gleichmäßige Schallverteilung schwierig. Zudem zeigen sich die ungünstigen Sichtverhältnisse für das Publikum auf den Bühnenbereich. Eine günstige Positionierung eines Mischplatzes in der hinteren Mitte des Raumes ist ebenfalls kritisch.

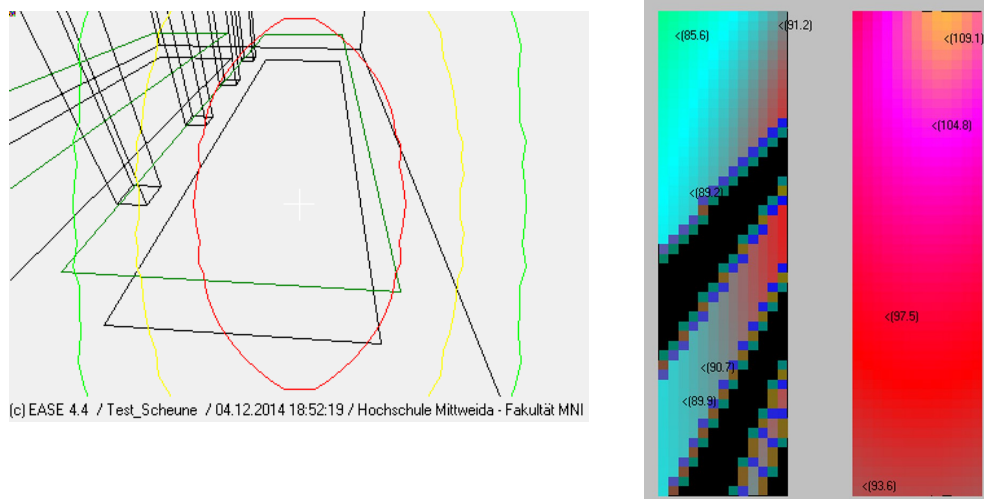


Abbildung 21: links: Loudspeaker Aiming eines einzelnen d&b Q7 Topteils. (Kreise als Abstrahlkurve: rot = -3 dB, gelb = -6 dB, grün = 9 dB) Recht: DirectSPL Mapping für die gewählte Ausrichtung bei 1 kHz.

Des Weiteren wurde der Lautsprecher auf die vorderen Plätze der Hörerfläche fokussiert, wodurch eine hohe Differenz des Schalldruckpegels zu den hinteren Plätzen von ca. 18 dB deutlich wird.⁴⁷ Abbildung zeigt daher eine geflogene Array- Konfiguration aus aus fünf d&b Q1 Lautsprecherboxen im herstellerspezifischen ArrayCalc Programm. Dabei wurde die Richtwirkung und Schalldruckverteilung auf den beiden Hörerflächen bei 4 kHz simuliert (Anhang 2). Die Höhe des obersten Elements wurde bei 4 Metern angesetzt und der Rahmen um -7° vertikal ausgerichtet. Der vertikale Abstrahlwinkel des Q1 beträgt 15° ab 5 kHz, mit einem maximalen Zwischenwinkel von 14° . Abbildung 22 zeigt dabei die Zwischenwinkel und das gesamte Gewicht pro Seite für die Hängpunkte. Zwischenwinkel kleiner 10° führen zu Überlappungsbereichen oberhalb 5 kHz, was in einem erhöhten Hochtוןpegel resultiert. Der fünfte Lautsprecher wurde für den vorderen Publikumsbereich mit 10° angewinkelt. Abbildung 23 zeigt die Seitenansicht des vertikalen Abdeckungsbereichs.

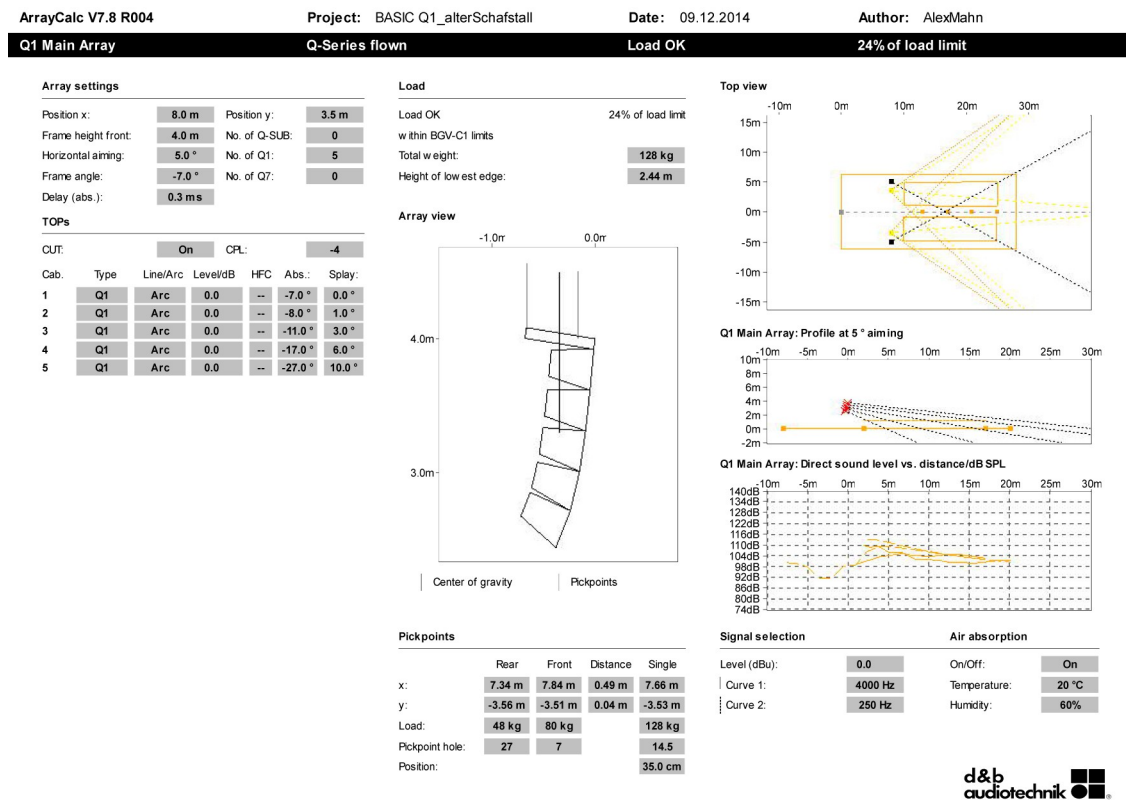


Abbildung 22: Array Setting mit 5 x Q1 pro Seite. Die zwei orangen Rechtecke markieren die bestuhlten Hörerflächen innerhalb des alten Schafstalls. Ohrhöhe bei 1,2m.

47 Der verwendete d&b Q7 Lautsprecher hat einen nominalen Abstrahlwinkel von horizontal 75° und vertikal 40° , mit der Möglichkeit das CD Horn um 90° zu drehen. Das Beispiel bezieht sich also auf 75° vertikaler Abstrahlung.

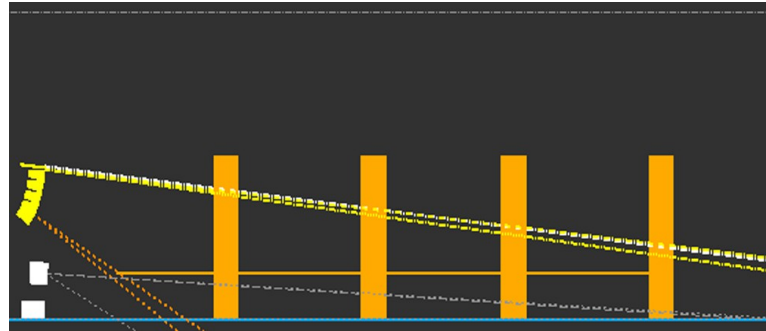


Abbildung 23: Seitenansicht der vertikalen Abdeckung des Arrays

In dieser Konfiguration wird auch der hintere Wandbereich mit angestrahlt. Zu beachten ist jedoch, dass die Hörerfläche mit einer Ohrhöhe von 1,20 m eingezeichnet ist. Die Veranstaltungen im alten Schafstall werden aber nicht nur bestuhlt stattfinden. Also kann ebenfalls mit einer Ohrhöhe von ca. 1,70 m gerechnet werden. Es muss daher ein Kompromiss aus akustischer Bedämpfung der Rückwand und der Ausrichtung des Arrays erfolgen. Eine Verringerung der Lautsprecheranzahl ist jedoch nicht zu empfehlen. Die Zwischenwinkel müssen sehr groß werden, um die komplette Hörerfläche abzudecken (Abbildung 24).

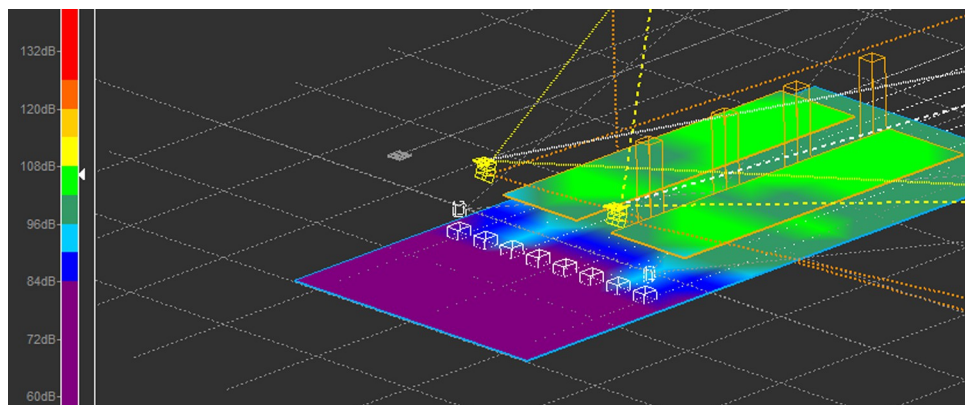


Abbildung 24: Isometrische Ansicht für 3 x Q1 pro Seite bei 4 kHz.

In der Summe stellen die Werte des Direktschallpegels die Spitzenpegel dar und müssen um mindestens 6 dB zurückgerechnet werden, um den kontinuierlichen Schalldruckpegel zu ermitteln. Anhang 3 zeigt die Konfiguration mit fünf Q1 pro Seite für 250 Hz. Der horizontale Nennabstrahlwinkel wird erst ab 400 Hz erreicht.

Der 250 Hz Bereich liefert dabei mehr Schalldruck und ist auf den erhöhten Zwischenwinkel zurückzuführen. Im Controller- Setup von d&b kann daher ein „Parameter Array EQ“ eingestellt werden, welcher den Frequenzgang glättet.

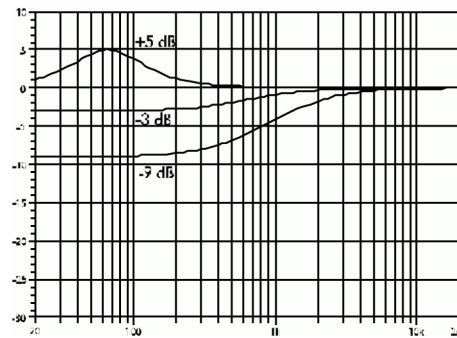


Abbildung 25: Wirkungsweise des CPL Filters

Manche Anwender kritisieren diese Möglichkeit als Unzulänglichkeit des Frequenzgangs des Q1. In dieser Arbeit geht es nicht darum für einen Hersteller zu werben, sondern den eigenen Erfahrungsbereich in die Simulation einzubringen. Das Q1 wird hierbei nicht als Referenz gewertet. Der Verfasser dieser Arbeit sieht jedoch die erhöhte Flexibilität des Setups als Vorteil an. Die persönliche Meinung des Verfassers geht dahin, dass ein Q1 Setup schon mit zwei bis drei Elementen pro Seite gut aufspielt, je nachdem welche Raumgröße zu beschallen ist. Die 2 x 10- Zoll- Tieftöner der Box lassen in der Abstimmung relativ viel Tief- Mitten- Pegel zu. Dies kann bei größeren Arrays negative Auswirkungen haben wenn die akustische Kopplung einsetzt. Daher wurde im Setup der CPL Filter auf -4 dB gesetzt (Abbildung 22).

Ziel einer jeden Beschallungskonzeption sollte es sein, Pegelschwankungen auf der Hörerfläche größer 6 dB zu vermeiden. Phasenbezogene Kammfilter-Effekte bzw. destruktive Interferenzen sollen ebenfalls vermieden werden. Der Maximalpegel unterliegt der gesetzlichen Norm.⁴⁸ Innerhalb dieser Grenzen sollte der Minimalpegel genug Signal-Stör-Abstand für gute Sprachverständlichkeit und musikalische Klarheit aufweisen (Punkt 5.6 / 5.7). Daher ist eine reine Betrachtung der Schalldruckverteilung per Array-Calc- Software nicht ausreichend. Räumliche Einflüsse werden bei dieser natürlich ausgeklammert. Dennoch kann durch Mapping- Darstellung auch der Bühnenbereich betrachtet werden.

48 DIN 15905-5

Dieser muss so gut wie möglich von der Beschallungsanlage „verschont“ bleiben. Damit wird Bühnenverständlichkeit für die Darsteller wesentlich verbessert und es müssen viel geringe Pegel aus der Monitoranlage und Backline gefahren werden.⁴⁹

Außerdem verbessert sich die Koppelfestigkeit der Mikrofone auf der Bühne. Gerade für die Aufstellung der Bass- Lautsprecher ist dies in jedem Raum ein heikles Thema, bei welchem der Frequenzbereich von 30-120 Hz optimiert und sogenannte „Basslöcher“ vermieden werden müssen. Abbildung 26 zeigt die Auswirkungen des Quellenabstandes von zwei 18 Zoll- Bass- Lautsprechern bei 50 Hz. Links ist ein deutliches Interferenzmuster zu sehen, wenn die Bässe links und rechts der Bühne angeordnet sind.

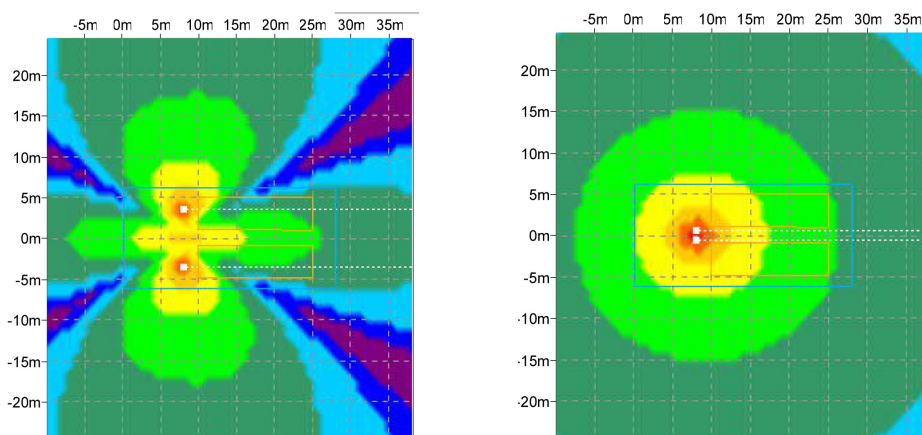


Abbildung 26: 2x Q Sub. Links: Abstand 7m. Rechts: Abstand 1m, mit akustischer Kopplung bei 50 Hz

Bei beiden Beispielen wird jedoch deutlich, dass auf diese Art und Weise keine Rückwärtsdämpfung für den Bühnenbereich möglich ist. Vor allem für Mono- Cluster oder Zahlücken- Aufstellung als Bassreihe vor der Bühne, entsteht des Schalldruck- Maximum auch im Bühnenbereich (siehe Abbildung 26- rechts). Im Bezug für die Aufstellung von Bässen gibt es sehr viele Ansätze. Diese sind alle von mehreren Faktoren, wie Platzbedarf, Lautsprecher- und Verstärkeranzahl und dem dafür notwendigen Kostenaufwand abhängig. Mit 3 Q-Sub- Bässen lässt sich ein sogenanntes „Cardoid Subwoofer Array“ aufbauen. In diesem Fall wird der mittlere Q-Sub um 180° gedreht und strahlt zur Bühne. Außerdem muss ein kurzes Delay eingestellt werden, da die akustischen Zentren der Bässe zu einander verschoben sind. Hierfür wird ein zusätzlicher Verstärker- und Controller- Kanal benötigt.

⁴⁹ Backline: sinngemäß „hintere Reihe“. Ausstattung der Musikgruppen auf der Bühne (Verstärker, Schlagzeug etc.)

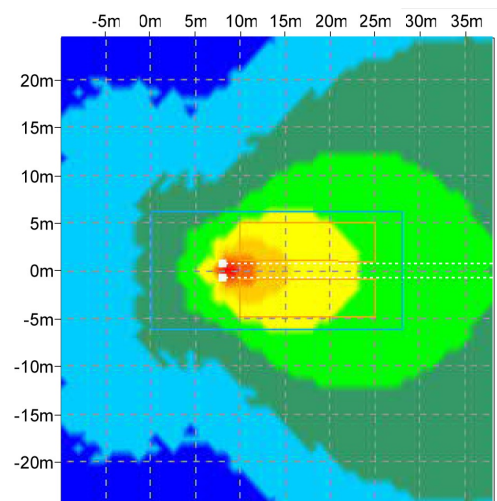


Abbildung 27: 2x CSA Stack im Abstand von 1m, mit jeweils 3 Q-Sub übereinander bei 50 Hz. Mittlerer Q-Sub wird im Stack um 180° gedreht und an einem separaten Verstärkerkanal im CSA Modus betrieben.

Viele Hersteller bieten auch einzelne Lautsprecher mit integriertem kardioiden Aufbau. Bei d&b ist das der V-Sub, welcher mit zwei Langhubtreibern bestückt ist. Der 18"-Treiber strahlt in Bassreflexabstimmung nach vorn und ein 12"-Treiber in einem Bandpass-Design nach hinten. Abbildung 28 zeigt eine Zahnlücken-Aufstellung von acht V-Sub Bässen in einem Mindestabstand von einem Meter. Das Resultat ist eine deutliche Rückwärtsdämpfung und eine verbesserte Verteilung des Direktschalls auf die Hörerfläche.

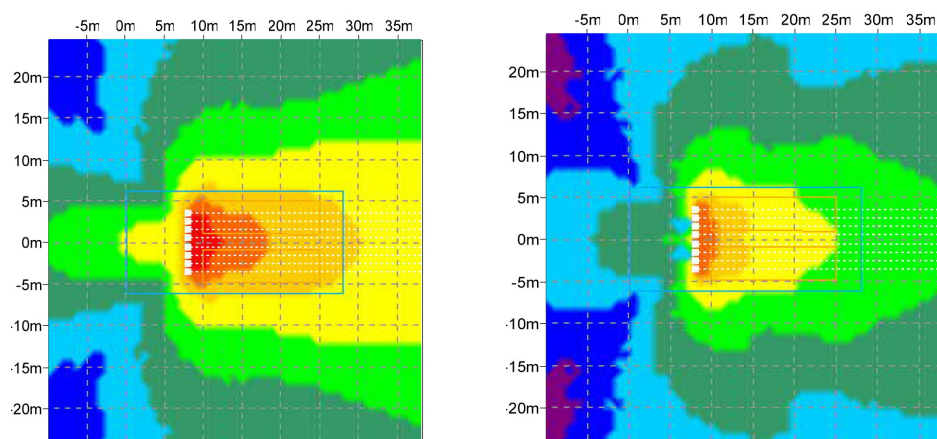


Abbildung 28: Gerichtete Abstrahlung mit 8xV-SUB im Abstand von 1m bei links 50 Hz und rechts 100 Hz

Zur Überprüfung wurde das erstellte Q1- Setup als DLL- Datei (Dynamic Link Library) exportiert und in EASE eingefügt. Abbildung 29 beschreibt die Direktschallverteilung auf die großen Wandflächen des alten Schafstalls. Die Gehäusezeichnungen des Arrays wurden in der Darstellung des Mappings nicht mit übernommen. Hier wird vor allem deutlich, wie schwierig es ist den Direktschallanteil auf die Hörerflächen zu begrenzen. Vor allem von den Seitenwänden kann hier mit starken Reflexionen gerechnet werden. Außerdem zeigt das Setup eine nicht ausgeglichene Direktschallverteilung auf der Hörerfläche selbst. Ohne Lautsprecher die zusätzlich den Bereich vor der Bühne abdecken, ist mit einem Abstrahlungsloch zu rechnen. Auch die hinteren Sitzreihen werden nicht gänzlich abgedeckt. Dies wurde schon während der Ausrichtung im ArrayCalc angesprochen. Der Planer muss hier mit zwei verschiedenen Ohrhöhen rechnen.

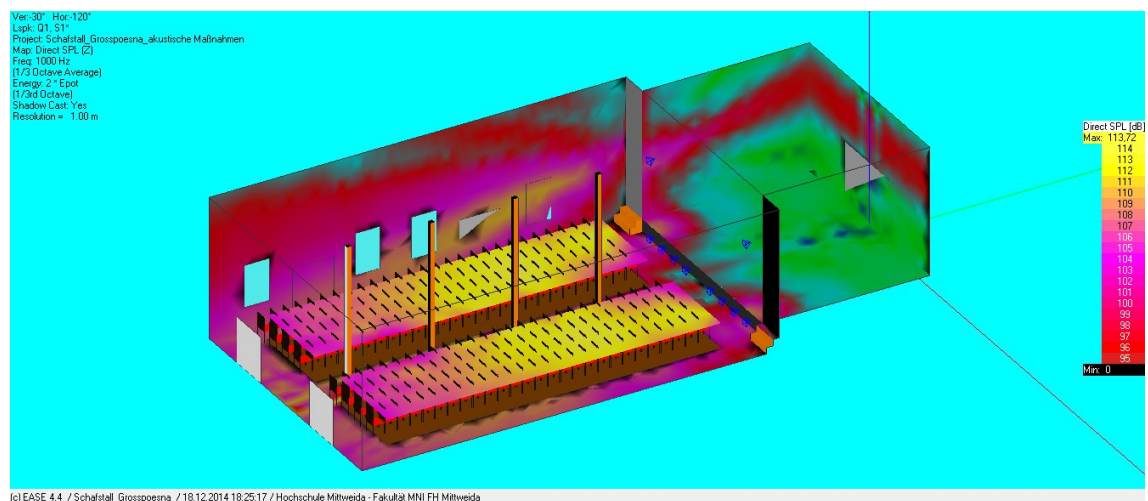


Abbildung 29: Room Mapping - DirectSPL bei 1 kHz

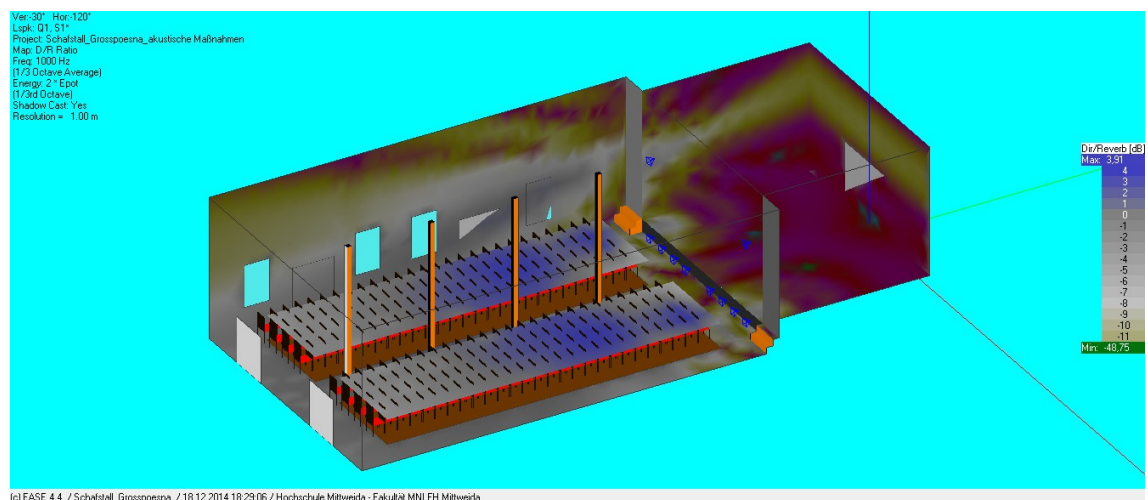


Abbildung 30: Room Mapping - D/R - Ratio bei 1 kHz

In Abbildung 30 weist die Messung auf deutliche Raumschallanteile im Verhältnis zum Direktschall auf. Ein Wert unter Null bedeutet mehr Raumschallpegel als Direktschallpegel.

4.5 Image Source Modell

Die Ermittlung der Raumimpulsantwort bei simulierter Schallausbreitung kann durch das Spiegelquellenmodell erfolgen. Dabei wird ein Sender und Empfänger im Raum platziert und alle virtuellen Spiegelquellen erster bis n -ter Ordnung berechnet.

Das Ergebnis wird danach einem „Hörbarkeitstest“ unterzogen, bei der jede Spiegelquelle von der Empfängerposition zurückverfolgt wird. Mit der Feststellung, ob sich der Reflexionspunkt überhaupt in der Begrenzungsfläche befindet, bzw. ob der Schallweg durch Raumelemente verdeckt wird.

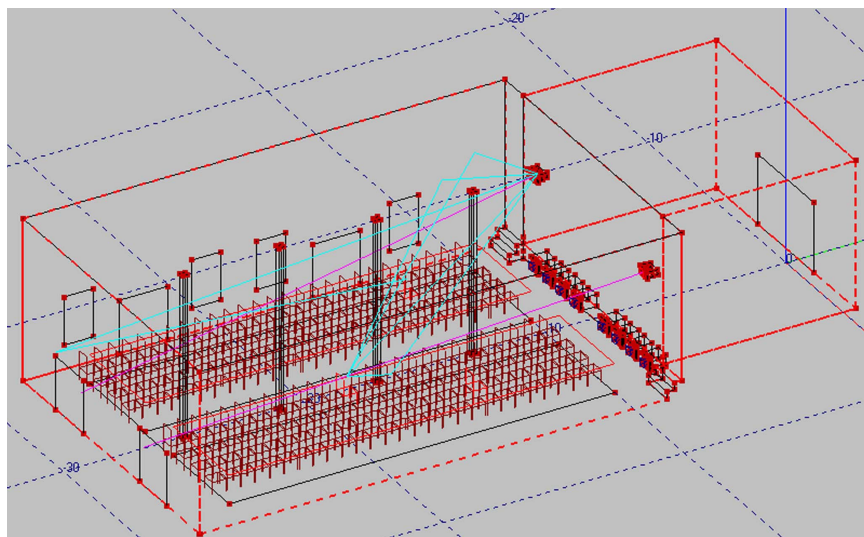


Abbildung 31: Mirror Image der 1. Ordnung für drei Empfängerplätze

Die berechnete Impulsantwort stellt alle Übertragungswege mit Laufzeiten und Pegelverlusten. Maßgeblich durch Luft- und Wandabsorption. Der Rechenaufwand steigt dabei exponentiell mit der Anzahl der Wandflächen N und der Ordnung i der Wandreflexionen, mit N^i . In einem Raum mit 50 Wandflächen und zwei Sendern wären es bei der Reflexion dritter Ordnung schon 250000 Spiegelquellen.

Würde der Anwender mehrere Schallquellen als einzelne Array Elemente benutzen und nicht zu einen Cluster zusammenführen, dann würde sich die Rechenzeit bei 50 Wandflächen exorbitant erhöhen. Bei einer kleinen Array- Anordnung von beispielsweise vier Elementen pro Seite, würden insgesamt acht Sender in der Berechnung einfließen. Nach Vorländer beschränkt sich ein praktikabler Anwendungsbereich auf eine Impulsantwort zweiter bis dritter Ordnung und einfache Raumgeometrien mit wenigen Wandflächen.⁵⁰ Außerdem werden Ungenauigkeiten in der Berechnung des Reflexionsfaktor durch streifenden Schalleinfall und die generellen Grenzen der geometrischen Akustik benannt.⁵¹

4.6 Ray Tracing

Bei diesem Verfahren werden von einem Sender eine bestimmte Anzahl von Schallstrahlen bzw. Schallpartikeln in alle Richtungen gesandt. Dabei können dem Sender als Schallquelle Richtungseigenschaften zugeordnet werden, d.h. entweder eine gleichmäßiger Verteilung der Schallenergie nach einer statistischen Winkelverteilung, oder aber eine Häufigkeit der Schallverteilung nach einer Richtcharakteristik. Wie bei der Spiegelquellenmethode der Energieverlust einberechnet. Durch die Wandabsorption und durch die mit der Laufzeit steigende Luftdissipation. Der Streugrad kann indes- sen als statistischer Parameter einfließen (siehe 4.3.2). Der Empfänger wirkt dabei an seiner Position als eine Art Detektor, welche als Flächendetektor winkelabhängig und als Kugeldetektor winkelunabhängig sind.⁵² Die Schallstrahlen, welche diese Zählkugel durchlaufen oder sehr nah an ihr vorbei kommen, werden als Treffer gewertet und bilden die Impulsantwort aus der Weg-Zeit- Differenz und der verbliebenen Energie. Der Rechenaufwand steigt dabei linear mit der Anzahl der Wände, wobei die Genauigkeit der Berechnung mit der Zeit abnimmt. Die einzelnen Partikelstrahlen streben mit steigender Laufzeit auseinander, wodurch sich die direkten Treffer beim Detektor verringern. Verschiedene Verfahren versuchen diese Problematik zu umgehen, indem z.B. die Größe des Detektors an die Laufzeit anpasst wird. Für aussagekräftige Ergebnisse wird meist eine Berechnung bis zur 5. Ordnung vorgeschlagen.

⁵⁰ Vgl. Vorländer M., 2008: Seite 204

⁵¹ Vgl. ebd.: Seite 205

⁵² Vgl. ebd.: Seite 187

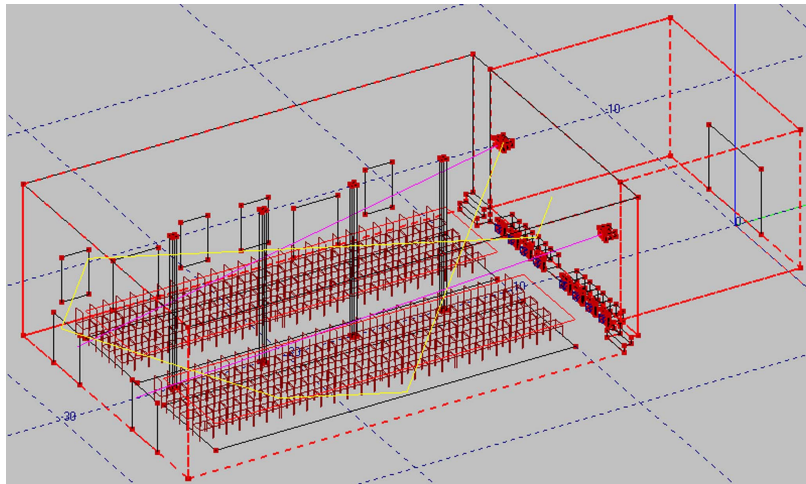


Abbildung 32: Ray Tracing vom einem Strahl bis zur 5. Ordnung

EASE 4 kann eine hybride Methode aus Spiegelquellenverfahren und Strahlenverfolgung nutzen. Die Option *find impacts* implementiert, nach Eintreffen der Schallstrahlen im Detektor, eine Mirror Image Routine zur Identifizierung.

4.7 Auralisation

Die Auralisation ist ein Werkzeug zur Hörbarmachung von Raumimpulsantworten, durch die Transformation eines erzeugten Reflektogramms. Dabei wird ein Anregungssignal mit der berechneten Impulsantwort mathematisch gefaltet und ein Zeitsignal errechnet. Mit diesem wird der akustische Einfluss des Raumes beschrieben, bei der Übertragung von einem Sender zu einem Empfänger. Eine Audio- Datei (.wav) kann somit transformiert und angehört werden.

5 Gütekriterien der Raumakustik

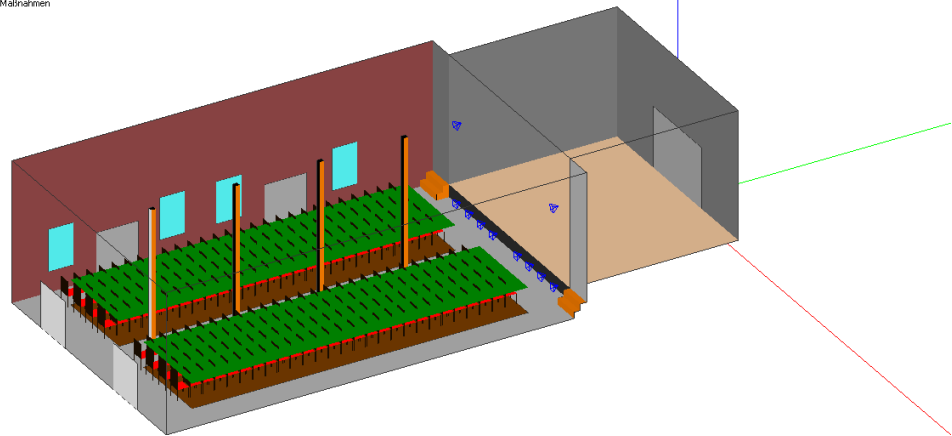
Die größte Schwierigkeit dieser Simulation liegt darin, dass der Veranstaltungsraum in seiner realen Struktur noch nicht existiert. Ziel muss es daher sein, eine möglichst realistische Abschätzung der Materialdaten und ihrer Absorptionsgrade vorzunehmen. Gewissermaßen ist dies Vor- und Nachteil zu gleich. Der Vorteil der Simulation liegt gerade darin, verschiedene Änderungen der gesamten Raumstruktur zu untersuchen, ohne einen materiellen Kostenfaktor. Die größte Herausforderung besteht darin, die akustischen Probleme und ihre Lösung zu diskutieren und eine praktikable Abschätzung für reale Umsetzung zu finden. Gerade deshalb wurden im Rahmen die Arbeit die Grundlagen der Raumakustik und ihre Übertragung auf die Simulationstechnik ausgedehnt diskutiert.

Tabelle zeigt die Annahme der Materialdaten der Grundstruktur über Oktav- Mitten-Frequenzen. Diese großen Begrenzungselemente wurden den realen Begebenheiten angelehnt. Unter den dem alten Rauputz der Wandflächen befinden sich beispielsweise Wandziegel.

[Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000	Anteil
Wand - Wandziegel	0,19	0,18	0,19	0,17	0,18	0,18	0,19	20,61 %
Fußboden - Beton	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,05	0,06	20,53 %
Bühne - Parkett	0,1	0,07	0,05	0,05	0,06	0,06	0,06	6,46 %
Säulen – Stahlträger (Noppenware)	0,01	0,03	0,05	0,11	0,32	0,66	0,88	1,33 %
Fenster – Doppel - Glas	0,25	0,1	0,07	0,06	0,04	0,02	0,02	0,78 %
Treppen - Holzplatten	0,04	0,04	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,74 %
Dünner Stoff	0,04	0,05	0,11	0,18	0,3	0,35	0,28	0,48 %
Holzstuhl	0,02	0,02	0,04	0,06	0,01	0,01	0,01	10,34 %

Tabelle 3: Absorptionsgrade der Grundstruktur

Ver: 30° Hor: 120°
 Lspk: Q1, S1*
 Project: Schafstall_Grosspoerna_akustische Maßnahmen
 Dye: Fast Colors
 Freq: 1000 Hz



[c] EASE 4.4 / Schafstall_Grosspoerna / 18.12.2014 20:50:48 / Hochschule Mittweida - Fakultät MNI FH Mittweida

Abbildung 33: Standard Rendering des alten Schafstalls als Konzept

5.1 Nachhallzeit T_N

Wie in Punkt 4.3.1 beschrieben, ist die Nachhallzeit mit dem Reflexionsgrad und dem Absorptionsgrad verbunden, mit der Annahme eines statistischen Energieverlustes bei jeder Schallreflexion. Nach Gleichung 5.1-1 verringert die Schallenergie um jede Reflexion mit $1-\alpha$.

$$E_R = E_0(1-\alpha) \quad \text{Gl.5.1-1}$$

Da in einem Raum sehr viele Reflexionen vorkommen, nimmt die Gesamtenergie nach n Reflexionen mit $(1-\alpha)^n$ ab. Die reflektierte Energie in Abhängigkeit der Zeit ist also ⁵³

$$E(t) = E_0(1-\alpha)^n \quad \text{Gl.5.1-2}$$

$$E(t) = E_0 e^{n \ln(1-\alpha)} \quad \text{Gl.5.1-3}$$

⁵³ $(1-\alpha)^x = e^{x \cdot \ln(1-\alpha)}$

Die Strecke, die das Signal in einem Raum zurücklegt, wird als mittlere freie Wegstrecke l_{mf} beschrieben und kann mit dem Volumen V und der Gesamtoberfläche S angenähert werden.

$$l_{mf} \approx \frac{4V}{S} \quad \text{Gl.5.1-4}$$

Nach dieser Approximation wird jeder Strahl nach einer gewissen Zeit n -mal reflektiert und zwar aus dem Verhältnis der mittleren freien Weglänge und der Schallgeschwindigkeit. Der Absorptionsgrad im Exponenten beschreibt den Verlauf des Energieabfalls und ist stets negativ, da α nur zwischen 0 und 1 liegen kann.

$$E(t) = E_0 e^{t \left(\frac{c_0}{4V} \right) S \ln(1-\alpha)} \quad \text{Gl.5.1-5}$$

Die Nachhallzeit T_{60} ist dabei folgendermaßen definiert. „Sie ist die Zeit, die nach Abschalten einer Schallquelle in einem Raum vergeht, bis die mittlere, eingeschwungene Schallenergiedichte $w(t)$ auf 1/1.000.000 des Anfangswertes w_0 oder der Schalldruck auf 1/1.000, d.h. um 60 dB abgeklungen ist.“⁵⁴ Im Zusammenhang mit der Luftdissipation ergibt sich die Eyring'sche Formel für die Nachhallzeit.

$$T_{\text{Eyring}} = \frac{24 \cdot \ln(10)}{c} \frac{V}{4mV - S \ln(1-\bar{\alpha})} \quad \text{Gl. 5.1-6}$$

Der Abfall des Schalldruckpegels kann messtechnisch nur bis zum Erreichen des Störpegels der jeweiligen Umgebung nachvollzogen werden, was vor allem im tieffrequenten Bereich schwierig ist. In der Praxis wird daher die Nachhallzeit in Intervallen von -5 dB bis -15 dB (T_{10}), bis -25 dB (T_{20}) und bis -35 dB (T_{30}) angegeben und dann für -60 dB (T_{60}) hochgerechnet.

Die Nachhallformel nach Sabine liefert nur hinreichend genaue Ergebnisse für einfache Raumgeometrien und kleine bis mittlere Absorptionsgrade ($\bar{\alpha} \leq 0.2$).⁵⁵ Dabei wird der natürliche Logarithmus ersetzt und in kleinen Räumen auch die Luftdissipation vernachlässigt.

⁵⁴ Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 188

⁵⁵ Vgl. ebd.

$$T_{Sabine} = 0,163 \frac{V}{S \cdot \alpha} \quad \text{Gl. 5.1-7}$$

Abbildung 34 zeigt die Nachhallzeit, für die in Tabelle 3 angenommenen Absorptionsgrade der Grundstruktur (mit Stuhlreihen ohne Publikumsbesetzung). Vor allem im Bassbereich wird eine deutliche Überhöhung bis in die oberen Mitten- Frequenzen ersichtlich. Die Schröder- Frequenz liegt bei diesen großen Raumdimensionen bei ca. 36 Hz. Um auf das Planziel von 1,5 Sekunden Nachhallzeit zu kommen, muss also deutlich in die Struktur eingegriffen werden. Für tiefe Frequenzen wären also Resonanz-Absorber von Nöten, wobei in diesem Beispiel schon sehr breitbandig eingegriffen werden muss.

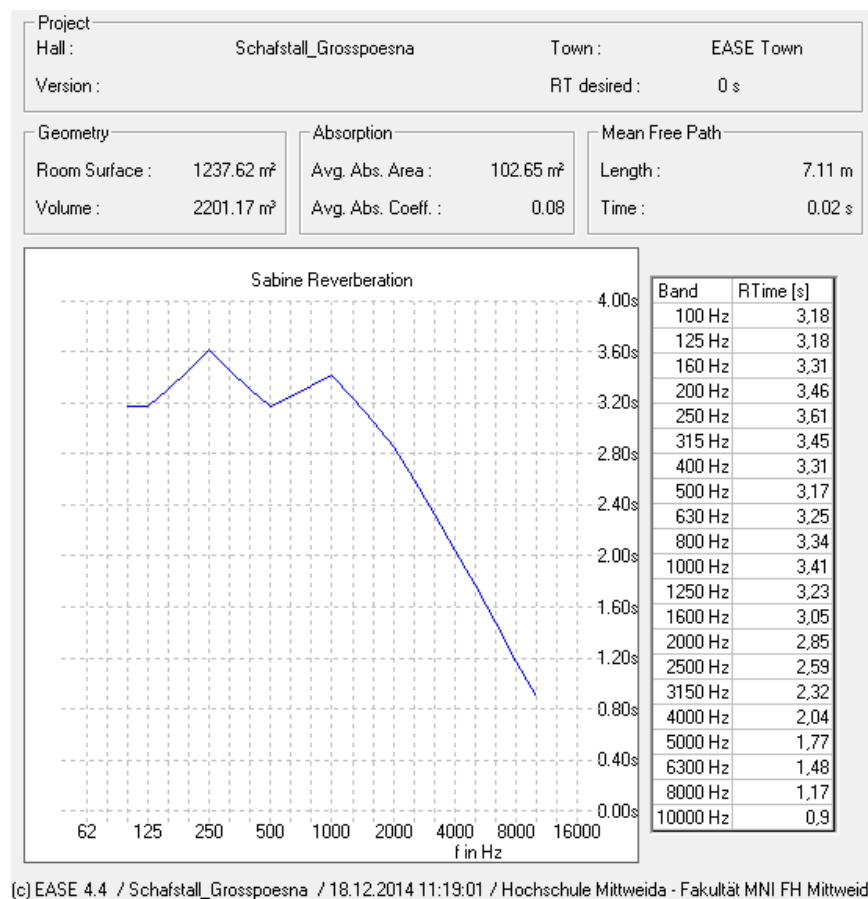


Abbildung 34: Nachhallzeit nach Sabine für die Grundstruktur des alten Schafstalls

Bei vielen Versuchen hat sich vor allen der Deckenbereich als sehr gute Dämpfungsmöglichkeit erwiesen. Die Decke ist mit 250 m² eine entsprechend große, plane Ebene. Und für eine akustische Ausgestaltung entsprechend teuer. Dennoch wurde bei dieser Maßnahme sehr großzügig experimentiert. Ausgehend von der Messung mit fast perfektem Absorptionsgrad über den gesamten Deckenbereich (Abbildung 35).

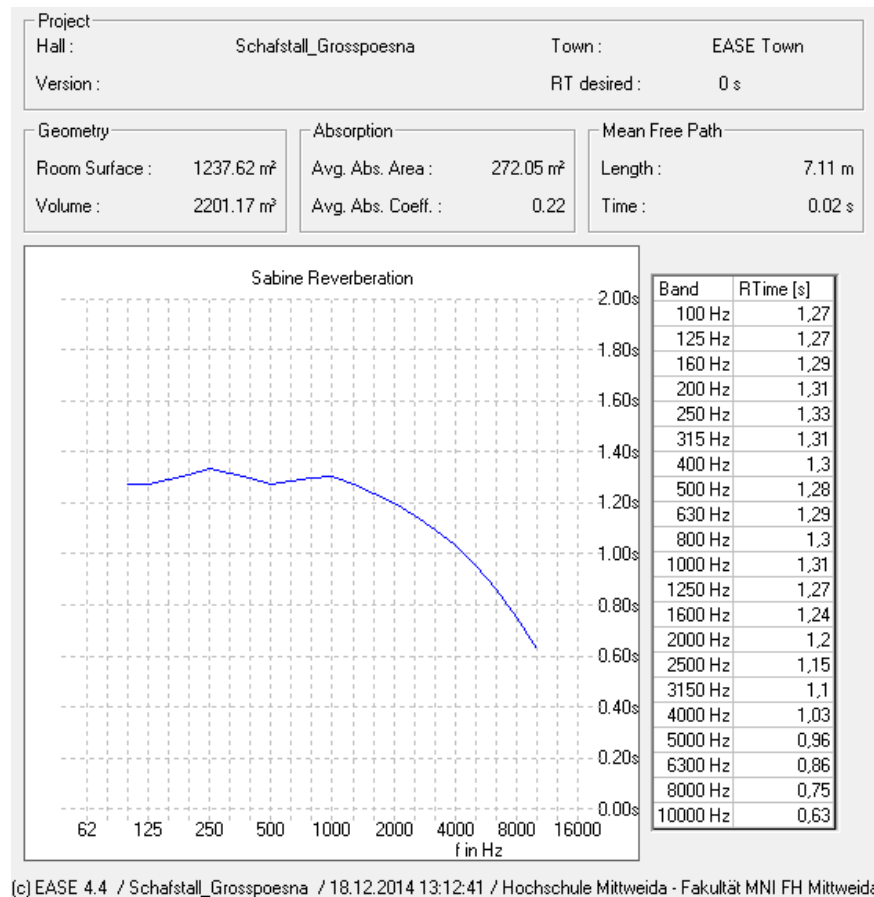


Abbildung 35: starke Reduzierung des Nachhalls bei linearem 80% Absorber nur im Deckenbereich.

5.2 Hallradius r_H

Der Abstand von der Schallquelle mit kugelförmiger Richtcharakteristik, bei dem die Direktschallenergiedichte w_d und die Diffusschallenergiedichte w_r gleich groß ist, wird als Hallradius bezeichnet.⁵⁶

⁵⁶ Vgl. Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 183

Die Energie des Direktschallfeldes nimmt mit dem Quadrat des Abstandes zur Schallquelle ab und die Diffusschallenergie sinkt mit steigendem Absorptionsgrad der reflektierenden Wände im Raum. Daraus kann der Hallradius geschlossen werden.

$$w_d = w_r = \frac{P}{4 \cdot c \cdot \alpha} \sqrt{\frac{A}{16\pi}} = r_H \quad \text{Gl. 5.2-1}$$

Darüber hinaus lässt sich der Hallradius auch durch das Raumvolumen und die Nachhallzeit nach der Formel von Sabine (Gl. 2.1) berechnen.

$$r_H \approx 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}} \quad \text{Gl. 5.2-2}$$

Bei Schallquellen unterschiedlicher Richtcharakteristik, wird die Bezeichnung Hallabstand bzw. Richtentfernung verwendet. Dieser ist folglich in den verschiedenen Richtungen auch unterschiedlich groß ist.

5.3 Artikulationsverlust Al_{cons} für Sprache

Der Artikulationsverlust gesprochener Konsonanten Al_{cons} (articulation loss of consonants) ist ein Beurteilungskriterium welches von dem niederländischen Akustiker Victor Peutz im Jahr 1971 entwickelt wurde. Die Berechnung erfolgt näherungsweise durch die Entfernung der Quelle zum Empfänger r_{QH} , im Bezug zum Hallradius r_H und der Nachhallzeit T . Eine Erhöhung der Nachhallzeit führt folglich zu einer Verschlechterung der Sprachverständlichkeit, da der Nachhall wie Störschall wirkt und somit den Signalgeräuschabstand reduziert.

$$Al_{cons} \approx 0,625 \left(\frac{r_{QH}}{r_H} \right)^2 \cdot T \quad \text{Gl. 5.3-1}$$

Außerdem kann eine Bewertung von Alcons nicht nur als Nachhallzeitkriterium erfolgen, sondern durch die gemessene Raumimpulsantwort bzw. Sprungantwort $h(t)$ als lineares Systemverhalten des Raumes. Dabei wird die Schallenergie innerhalb eines definierten Teils der Impulsantwort berechnet. Dies geschieht durch die Integration der Energiedichte E_t (Gl. 2.8) über ein entsprechendes Zeitintervall. Für Al_{cons} wird daher die Direktschallenergie bis 35 ms und die Nachhallenergie nach 35 ms eingesetzt.⁵⁷

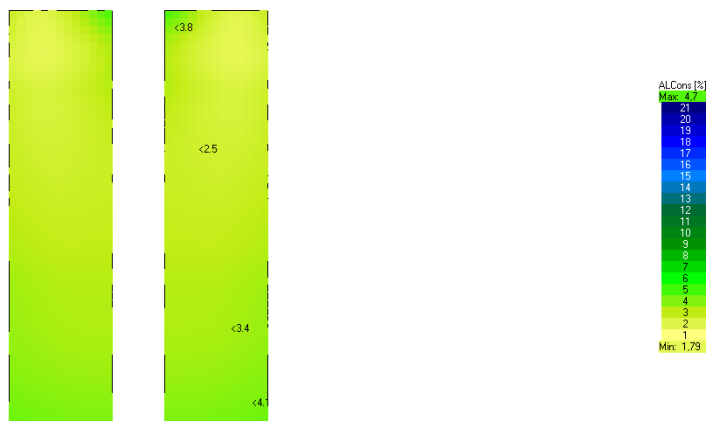
$$E_t = \int_0^t h^2(t') dt'$$

Gl. 5.3-2

$$Al_{cons} \approx 0,625 \left(\frac{E_{\infty} - E_{35}}{E_{35}} \right) \cdot T \quad \text{Gl. 5.3-3}$$

Eine Erhöhung der Nachhallzeit führt folglich zu einer Verschlechterung der Sprachverständlichkeit da der Nachhall wie Störschall wirkt. Al_{cons} wird für die 1000 Hz- bzw. 2000 Hz- Oktave angegeben.⁵⁸

Schafstall_Grosspoesna
Used:
Lspk: Q1, S1+
Map: Articulation Loss (M)
Energ: 2 * Epot
(1/3rd Octave)



(c) EASE 4.4 / Schafstall_Grosspoesna / 19.12.2014 00:27:19 / Hochschule Mittweida - Fakultät MNI FH Mittweida

Abbildung 36: Alcons bei 1 kHz für das Q1 Setup mit sehr guten bis guten Werten

⁵⁷ Vgl. Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 193

⁵⁸ Vgl. ebd.

5.4 Sprachübertragungsindex STI

Das Messverfahren des *STI* (Speech Transmission Index) beschreibt den Modulationsverlust des Schallsignals von der Schallquelle zum Empfänger. Dabei werden die Oktav- Mitten- Frequenzen f_0 ab 125 Hz bis 8000 Hz gemessen. Diese werden wiederum aus den unteren Grenzfrequenzen f_1 und oberen Grenzfrequenzen f_2 der jeweiligen Oktave gebildet.

$$f_0 = \sqrt{f_1 \cdot f_2} = \sqrt{2} \cdot f_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot f_2 \quad \text{Gl. 5.4-1}$$

Da der Singalgeräuschabstand nicht nur durch den Nachhall, sondern durch alle Signalveränderungen im Raum beeinflusst wird, liegt die Idee des STI Messverfahrens im Vergleich der Sprachverständlichkeit an der Quelle und an der Hörposition.

Der Modulationsgrad des anregenden Signals im Verhältnis zur Hörposition wird durch die sogenannte Modulationsübertragungsfunktion *MTF* (Modulation Transmission Funktion) errechnet. Hierbei werden die Signalfrequenzen von 125 Hz bis 8 kHz mit 14 Frequenzen zwischen 0,63 Hz und 12,5 Hz im Terzabstand moduliert.⁵⁹ Bei der Übertragung im Raum entstehen dann durch alle akustischen Einflüsse wie Geräusche, Nachhall und Spätreflexionen, Modulationsverluste. In moderner Messsoftware wie Smaart v.7, werden nach der Schröder-Rückwärtsintegration alle Modulationsgrade aus der Impulsantwort abgeleitet.⁶⁰

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi F \cdot \frac{T}{13,8}\right)^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{-\left(\frac{S/N}{10dB}\right)}} \quad \text{Gl. 5.4-2}$$

F Modulationsfrequenz in Hz

T Nachhallzeit an der Messposition in s

S/N Signal-Stör- Verhältnis.

⁵⁹ Vgl. Vgl. Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 194

⁶⁰ Vgl. rational acoustics / Info

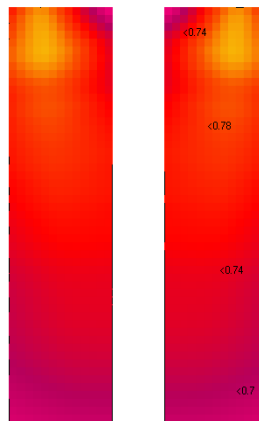
Weitere vereinfachte Verfahren wie *RASTI* (Rapid Speech Transmission Index), wodurch der Sprachübertragungsindex näherungsweise berechnet werden kann, werden durch immer leistungsfähigere Soft- und Hardware kaum noch benutzt.

Folgende Tabelle 1 zeigt die unterschiedliche Bewertung der Sprachverständlichkeit von *STI* und *Al_{cons}* im Vergleich. Darüber hinaus finden sich in der Literatur leicht unterschiedliche Bewertungseinteilungen, welche aber im wesentlichen die gleichen subjektiven Einschätzungen wiedergeben.

STI	Alcons	Bewertung
< 0,3	> 33 %	unverständlich
0,3...0,45	15...33 %	schlecht
0,45...0,6	15...7 %	ausreichend
0,6...0,75	7...3 %	gut
0,75...1,0	3...0 %	ausgezeichnet

Tabelle 3: Zusammenhang *STI* und *Al_{cons}* ⁶¹

Schafstall_Grosspoesna
Used:
Lupk: Q1, S1*
Map: STI (M)
Energ: 2° Ept
(1/3rd Octave)



[c] EASE 4.4 / Schafstall_Grosspoesna / 19.12.2014 00:29:14 / Hochschule Mittweida - Fakultät MNI FH Mittweida

Abbildung 37: *STI* bei 1 kHz für das Q1 Setup mit sehr guten bis guten Werten

61 Vgl. Sengpiel E., Rechner *Al_{cons}* *STI*

5.5 Deutlichkeitsmaß C₅₀ für Sprache

Im Sinne der Projektplanung kann die Verständlichkeit von Sprachdarbietungen als essentiell betrachtet werden. An vielen Stellen einer subjektiven Bewertung von Veranstaltungsräumen, fällt eine unverständliche Sprache besonders schnell auf, ob nun durch eine elektroakustische Anlage verstärkt oder nicht. Mit der Formel C₅₀ kann die Verständlichkeit und Durchsetzungsfähigkeit von Sprache und Gesang ermittelt werden.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_{-\infty}^{50ms} p^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} p^2(t) dt} [dB] \quad \text{Gl. 5.5-1}$$

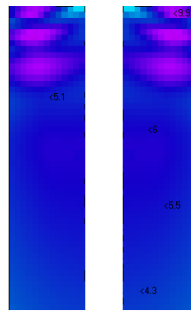
Das Deutlichkeitsmaß bewertet die Schallenergie, welche bis 50 ms nach Eintreffen des Direktschalls die Sprache unterstützt, im Verhältnis zur Schallenergie welche nach 50 ms folgt. Diese nachfolgenden Anteile werden im Bezug zur Sprachverständlichkeit als negativ bewertet. Hier finden sich zur Bewertung in der Literatur leicht abweichende Angaben. Fasold schreibt diesbezüglich: „ Mit [...] einem Deutlichkeitsmaß C₅₀>0dB werden sehr gute Silbenverständlichkeiten von mehr als 70 % gewährleistet.“⁶²

Während bei Ahnert und Tennhardt geschrieben steht: „ Ein Wert von C₅₀ = -2 dB wird als unterer Grenzwert für eine gute Sprach- bzw. Textverständlichkeit angesehen, bei dem die Silbenverständlichkeit nicht unter 80 % und die Satzverständlichkeit (Textverständlichkeit), die wegen des Kontextes höher als die Silbenverständlichkeit ist, nicht unter 95 % sinkt.“⁶³

⁶² Fasold W., 1998: Seite 150

⁶³ Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 192

Schalntal_Grosspoema
Used:
Lspk: Q1, S1*
Map: C50
Freq: 2000 Hz
(1/2 Octave Average)
Energy: 2 * Epot
(1/3rd Octave)



[c] EASE 4.4 / Schalntal_Grosspoema / 18.12.2014 23:59:24 / Hochschule Mittweida - Fakultät MNI FH Mittweida

Abbildung 38: C50 bei 1 kHz für das Q1 Setup mit sehr guten bis guten Werten

5.6 Klarheitsmaß C₈₀ für Musik

Analog zum Deutlichkeitsmaß verhält sich das Klarheitsmaß C₈₀ als weiteres Energiekriterium und vergleicht die eintreffende Schallenergie bis 80 ms mit der nach 80 ms folgenden Schallenergie.

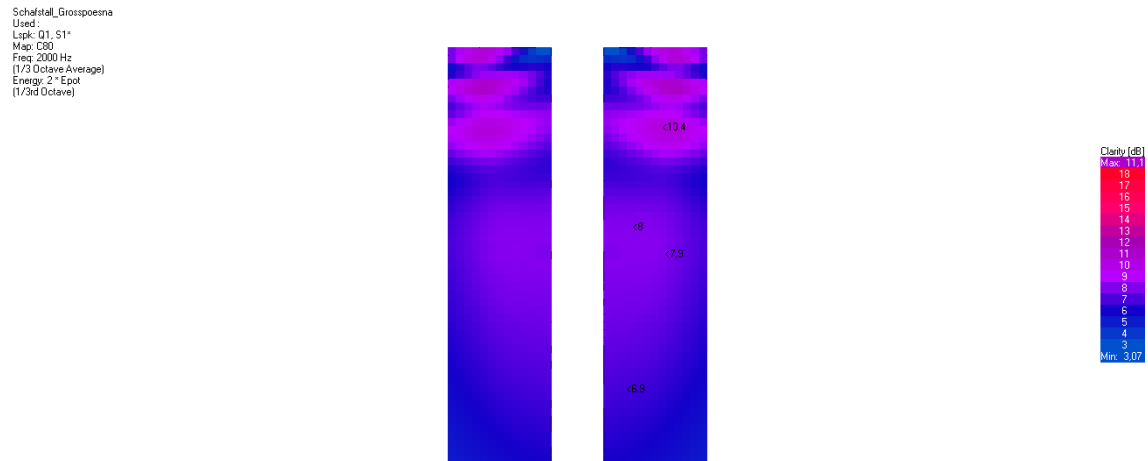
$$C_{80} = 10 \log \frac{\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad [\text{dB}] \quad \text{Gl. 5.6-1}$$

Als Gütekriterium wird hierbei aber nicht der Ausdruck der Musikverständlichkeit verwendet, sondern die Bezeichnung der Durchsichtigkeit bzw. Klarheit. Ein rechnerisches Ergebnis des Klarheitsmaßes von 0 dB bedeutet, dass der Hörer genau soviel Schallenergie bis 80 ms empfängt, wie nach 80 ms. Ein Ergebnis von 3 dB würde dem zur Folge eine Verdopplung der Schallenergie bis zur Zeitgrenze von 80ms im Vergleich zur Nachfolgenden bedeuten.

Unterschiedliche Musikstile führen dabei zu verschiedenen Bewertungen der Ergebnisse. Fasold nennt hier einen optimalen Bereich von -1 dB bis +3 dB.⁶⁴

⁶⁴ Vgl. Fasold W., 2003: Seite 136

Spezifischer wird bei Ahnert und Tennhardt auf die Arbeiten von Abdel Alim hingewiesen, welcher für klassische Musik eine ausreichende musikalische Klarheit bei einem Wert ca. - 1,6 dB und für romantische Musik bei ca. -4,6 dB beschreibt.⁶⁵ Die Hersteller von EASE geben für moderne Rock-Musik einen Wert von 6-8 dB an.



(c) EASE 4.4 / Schafstall_Grosspoesna / 19.12.2014 00:11:39 / Hochschule Mittweida - Fakultät MNI FH Mittweida

Abbildung 39: C80 bei 1 kHz für das Q1 Setup. Mit hohem C80 Wert von 11 dB aufgrund des Direktschall

5.7 Bassverhältnis *BR*

Das Bassverhältnis kann als Bewertungskriterium bezüglich der „Klangwärme“ des frequenzabhängigen Nachhalls herangezogen werden. Berechnet wird das Verhältnis von Oktav- Mitten- Frequenzen von 125 Hz und 250 Hz zu Oktav- Mitten- Frequenzen von 500 Hz zu 1000 Hz.⁶⁶

$$BR = \frac{T_{125\text{ Hz}} + T_{250\text{ Hz}}}{T_{500\text{ Hz}} + T_{1000\text{ Hz}}} \quad \text{Gl. 5.7-1}$$

Für Konzertsäle bzw. Musik wird ein Bassverhältnis von 1,0 bis 1,3, für Sprache ein Wert von 0,9 bis 1,0 angestrebt.

⁶⁵ Ahnert W., Tennhardt H.-P., 2008: Seite 192

⁶⁶ Baranek L., 2004: Seite 617

5.8 Nützliche und störende Reflexionen

Bei jeder praktischen Reflexionsbetrachtung sei angemerkt, dass zwischen nützlichen und störenden Reflexionen unterschieden werden muss. Während bei Musik Reflexionen zur Räumlichkeit und bei Sprache zur Verständlichkeit beitragen können, sind diese ab einem gewissen Verhältnis als unvorteilhafte Schallrückwürfe einzustufen. Dieser zeitliche Übergangsbereich von Direktschall zu Diffusschall wird nach Petzold als Verwischungsschwelle bezeichnet.⁶⁷ Im Laufe dieses Abschnitts soll auf die Charakteristiken von gewollten und ungewollten Reflexionen eingegangen werden.

Wie im Abschnitt 2.3 beschreiben, ist die Betrachtung der Laufzeit des Schalls für eine subjektive Bewertung der Reflexionen für den Hörer wichtig. Diesbezüglich sind drei Kategorien maßgebend. Direktschall, frühe und späte Reflexionen. Damit es also überhaupt zu praktischen Entscheidungen, wie beispielsweise der geometrischen Lenkung nützlichen Schalls kommen kann, muss zuerst eine Bewertung dieser drei Kategorien vorgenommen werden. In der Fachliteratur wird dem zur Folge nicht nur eine geometrische oder statistische Raumakustik zu Bewertung aller akustischen Kriterien herangezogen, sondern letztlich der komplexe Themenbereich der Psychoakustik. Im Rahmen dieser Arbeit kann keine Abhandlung dieses Forschungsfeldes stattfinden, jedoch sollen allgemeine Ergebnisse der Psychoakustik einfließen.

Bei Cremer werden nützliche Reflexionen zunächst allgemein innerhalb der Verwischungsschwelle von 50 ms angegeben, d.h. wenn der Schall innerhalb dieser Zeitspanne beim Hörer eintrifft.⁶⁸ Hierbei wird zwischen Sprache und Musik unterschieden.

Auch Fasold gibt diesem Bereich als Mittelwert für Sprache an, wobei für Musik 80 ms angesetzt werden. Dies wird mit der Tatsache begründet, dass bei Musik nicht nur Klarheit und Durchsichtigkeit gefordert werden, sondern auch spätere Reflexionen zur Räumlichkeit der Wahrnehmung beitragen können.⁶⁹

Fasold schreibt außerdem: „Im Gegensatz zu den Kriterien für die Sprachverständlichkeit geht es bei der Durchsichtigkeit der Musik nicht um die Einhaltung eines Grenzbereichs, sondern um das Gebiet optimaler Werte, denn die Durchsichtigkeit darf nicht zu groß werden. Es muss eine Ausgewogenheit zwischen frühen (bis etwas 80 ms) und späteren, starken diffusen Reflexionen, erreicht werden.“

⁶⁷ Vgl. Petzold E., 1927: Seite 8

⁶⁸ Vgl. Cremer L., 1978: Seite 69

⁶⁹ Vgl. Fasold W., 1998: Seite 52

Die letzteren tragen zu Raumeindruck bei, bewirken ein Gefühl des „Eingehülltsein“ in Musik, der Halligkeit und das ist für ein Konzerterlebnis gleichermaßen bedeutsam.⁷⁰

Weiterhin ist zu beachten, dass nicht nur die zeitliche Struktur der Reflexion für die Wahrnehmung ausschlaggebend ist, sondern auch die Pegeldifferenz zwischen Direkt- und Diffusschall.

Die nachfolgenden Punkte beschreiben das Raumverhalten für verschiedene Gütekriterien, welche mit der Raumimpulsantwort gemessen und als ETC Diagramm (energy time curve) dargestellt werden können. Zunächst werden die Kriterien zur Sprachverständlichkeit mit dem Artikulationsverlust von Konsonanten und der Sprachübertragungsindex beschrieben. Weitere Punkte sind die Energiekriterien Deutlichkeitsmaß für Sprache, Klarheitsmaß für Musik und die Schwerpunktzeit. Diese haben gemeinsam, dass die Anfangsschallenergie mit der späteren Schallenergie unter bestimmten Zeitgrenzen ins Verhältnis gesetzt wird. Das Echokriterium nach Dietsch und Kraak wertet die späten Reflexionen anhand der Impulsantwort aus.

5.9 Schwerpunktzeit t_s

Die Schwerpunktzeit t_s nach Kürer ist ein Energiekriterium, welches den Raumeindruck für Sprache und Musik am Hörersplatz wiedergibt. Dabei wird die Zeit berechnet, bei der die Schallenergie bis zum Zeitpunkt t_s , gleich der Schallenergie nach t_s ist.

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \quad [ms] \quad \text{Gl. 5.9-1}$$

Optimale Werte liegen bei 60 bis 80 ms für Sprache und für Musik bei 100 bis 150 ms.⁷¹ Laut Kürer zeigt sich zudem ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Schwerpunktzeit und der Silbenverständlichkeit.⁷²

⁷⁰ Fasold W., 1998: Seite 151

⁷¹ Vgl. Fasold W., 2003: Seite 136

⁷² Vgl. Cremer L., 1978: Seite 415

Diese ist zur Ermittlung der Silbenverständlichkeit besonders gut geeignet, da hiermit ein subjektives Gütekriterium objektiv messbar wird. Anderenfalls ist nach Cremer die Ermittlung des ersten Kriteriums besonders aufwendig und nur durch eine entsprechende Zahl von Versuchspersonen statistisch aussagekräftig.⁷³

5.10 Echo-Kriterium EK nach Dietsch und Kraak

Im negativen Sinn sind die späten, energiereichen Reflexionen nach Überschreiten der jeweiligen Verwischungsgrenze am deutlichsten wahrnehmbar. Diese störenden Reflexionen werden als Echo bezeichnet und treten dann auf, wenn die Laufzeit zwischen Direktschall und dem späten Rückwurf so groß wird, dass der Hörer beide Signale getrennt voneinander wahrnimmt. Für ein einsilbiges Wort wird die für ein Echo benötigte Laufzeit bei Cremer mit 100 ms angegeben.⁷⁴ Dies entspricht einer Wegstrecke für den Schall von ca. 34 m. Bei kürzeren Schallereignissen kann die Laufzeit auch wesentlich kürzer sein.

Eine objektive Bewertung hierfür bietet das sogenannte Echo-Kriterium nach Dietsch und Kraak von 1986. Die Berechnung aus der Raumimpulsantwort prüft, ob sich ein empfohlener Wert in einem bestimmten Zeitraum ändert. Diese Werte sind motivabhängig und können bei schnellen, impulsartigen Schallereignissen auch niedriger als der Durchschnittswert liegen. Wie bei der Schwerpunktzeit t_s wird für den Verlauf der Raumimpulsantwort der Differenzenquotient (mit Gl. 3.6) gebildet.

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta \tau_E} \quad \text{Gl. 5.10-1}$$

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^\tau |p(t)|^n t \cdot dt}{\int_0^\tau |p(t)|^n \cdot dt} \quad \text{Gl. 5.10-2}$$

Im Manual der Messsoftware Easera werden für das Echokriterium folgende Werte angegeben. Die Werte EK_{Grenz} geben dabei die empirisch ermittelten Grenzwerte für die Hörbarkeit der Echo an.

⁷³ Vgl. Edb., Seite 416

⁷⁴ Cremer L., 1978: Seite 55

Werden diese in sich wiederholenden Zeitabständen überschritten, entstehen Flutter-Echos, mit einer Periodizität von 50 ms bei Sprache und 80 bis 100 ms bei Musik.⁷⁵

1. Für Sprache nach Easera Appendix mit:

$$\Delta\tau_E = 9 \text{ ms}$$

$$n = 2/3$$

$$EK_{\text{Grenz}} = 1$$

2. Für Musik nach Easera Appendix mit Grenzwerten für klassische Musik:

$$\Delta\tau_E = 14 \text{ ms}$$

$$n = 1$$

$$EK_{\text{Grenz}} = 1,8 \text{ bis } 2 \text{ für Mozart}$$

$$EK_{\text{Grenz}} = 3 \text{ für Pianomusik}$$

$$EK_{\text{Grenz}} = 7 \text{ für getragene Musik wie Wagner}$$

75 Ahnert W., Schmitt W., 2006: Appendix to Easera

5.11 Zusammenfassung optimaler Akustik

Abseits weiterer Gütekriterien, welche im begrenzten Umfang der Arbeit nicht beschrieben wurden, lässt sich dennoch eine allgemeingültige Zielsetzung hinsichtlich optimaler Raumakustik formulieren. Diese wird zunächst unabhängig der Schallquelle beschrieben, denn auch eine Beschallungsanlage unterliegt dem Systemverhalten des Raumes. Eine rein elektroakustische Planung ist für ein ganzheitliches Raumkonzept nicht ausreichend. Dies gilt vor allem für akustisch problematische Räume. Der Hörer wird zudem immer Raum und Technik als ganzes Konzept wahrnehmen.

Für eine optimale Hörsamkeit sollte hinreichend viel Direktschallenergie auf der gesamten Zuhörerfläche vorhanden sein. Kurzzeitige Reflexionen bis 30 ms wirken unterstützend. Frühe Reflexionen für Sprache bis ca. 50 ms und für Musik bis ca. 80 ms erhöhen die Durchsichtigkeit und Klarheit. Seitlich einfallende Reflexionen von 25 bis 80 ms erhöhen die Räumlichkeit von Musikdarbietungen.

Späte und energiereiche Reflexionen erhöhen die Gefahr von Echos bzw. der Entstehung ungewollter Spiegelflächen und sind daher zu vermeiden. Konkret bedeutet dies, eine Vermeidung höherer Schallenergie der Reflexionsfläche als die der Schallquelle. Eine der Raumgröße und vor allem dem Nutzungsart entsprechende Nachhallzeit mit angepasstem Frequenzgang ist für den Raumakustiker und Beschallungstechniker besonders wichtig.

6 Fazit

Insgesamt hat sich gezeigt, dass durch Computersimulation eine Früherkennung von akustischen Problemen möglich ist. Die Grenzen der wissenschaftlichen Modelle sind dabei maßgeblich von den Größenverhältnissen des Betrachtungsgegenstandes abhängig. Für große Beschallungsräume sind die statistischen und geometrischen Verfahren hinreichend genau. Die Qualität der Ergebnisse hängt jedoch stark vom Wissen über das akustische Verhalten der verwendeten Materialien und Strukturen ab. Eine realistische Abbildung kann als nur in einer ganzheitlichen Planung und Voruntersuchung, mit Bausachverständigen und den Auftraggebern erfolgen. In der Simulation kann letztlich viel angenommen und verändert werden, ohne dass dies einen realen Bezug hätte. Eine Zusammenarbeit der Planer ist daher unerlässlich. Im Rahmen dieser Arbeit gab es diesbezüglich viele praktische Probleme. Angefangen von den fehlenden Bauplänen, über die nicht geklärten Nutzungsverhältnisse bis hin zur fehlenden Kommunikation seitens der Entscheider. Diese war keineswegs Teil der vorliegenden Arbeit, hat sich jedoch merklich auf die Entwicklung eines Nutzungskonzeptes ausgewirkt. Nichtsdestotrotz liegt auch gerade hier die Stärke von Simulationsprogrammen. Der Nutzer kann ohne großen Kostendruck experimentieren und dennoch realistische Ergebnisse erzielen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Beschallungskonzept entwickelt und in die dreidimensionale Grundstruktur übertragen. Die Implementierung dieser bedarf anderer Maßnahmen als die Konzeption eines klassischen Konzertsaaes. Die gleichmäßige Verteilung des Direktschallpegels und eine Begrenzung der Abstrahlung auf die Hörerzonen ist hierbei vordergründig.

Für komplexe und vor allem akustisch kleine Räume, werden leistungsfähigere Programme und Algorithmen benötigt. Numerische Verfahren wie die Finite-Elemente-Methode stehen aber noch nicht allen Programmen zur Verfügung und sind immer noch extrem rechenaufwändig.

7 Anhang

Abstrahlverhalten

Die folgende Grafik zeigt den Abstrahlwinkel über die Frequenz anhand von Schalldruck-Isobaren für -6 dB und -12 dB. Der horizontale Nennabstrahlwinkel von 75° wird ab 400 Hz erreicht.

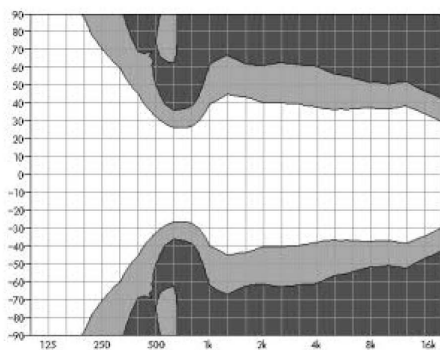


Fig. 6: Abstrahlcharakteristik Q1 horizontal

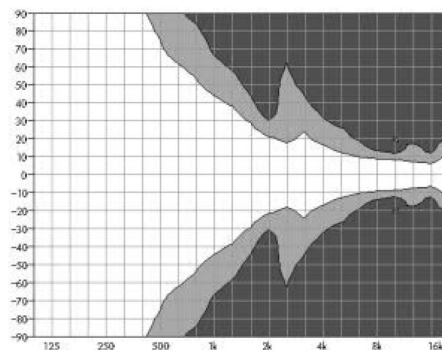


Fig. 7: Abstrahlcharakteristik Q1 vertikal

Technische Daten

Q1 Systemdaten

Frequenzgang (-5 dB Standard).....	60 Hz ... 17 kHz
Frequenzgang (-5 dB CUT Mode).....	100 Hz ... 17 kHz
Maximaler Schalldruck (1 m, Freifeld mit D12).....	139 dB
Maximaler Schalldruck (1 m, Freifeld mit D6).....	135 dB
(SPLmax peak, Test-Signal Rosa Rauschen mit Crest-Faktor 4)	
Eingangspegel (100 dB-SPL/1 m).....	-18 dBu

Q1 Lautsprecher

Nennimpedanz.....	8 Ohm
Belastbarkeit (RMS / peak 10 ms).....	400/1600 W
Nenn-Abstrahlwinkel (hor. x vert.).....	75° x 15°
Komponenten.....	2 x 10"-Lautsprecher
.....	1,3" Hochtontreiber
.....	Passive Frequenzweiche
Anschluss.....	2 x EP5
.....	optional 2 x NL4
Belegung.....	EP5: 1/2
.....	NL4: 1+/1-
Gewicht.....	22 kg

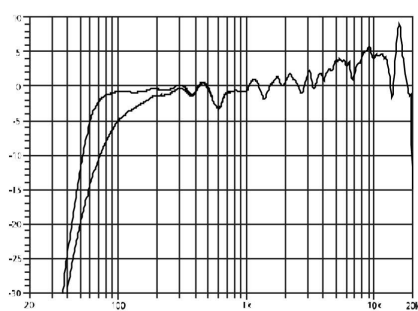


Fig. 8: Frequenzgang Q1, Standard und CUT-Schaltung, einzelner Lautsprecher

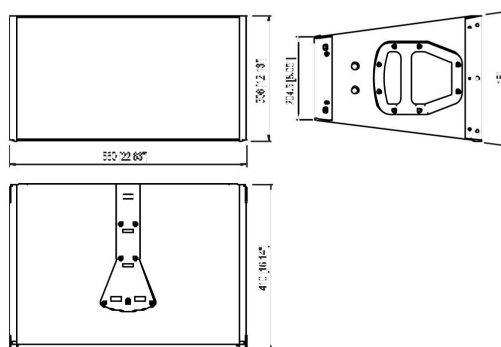
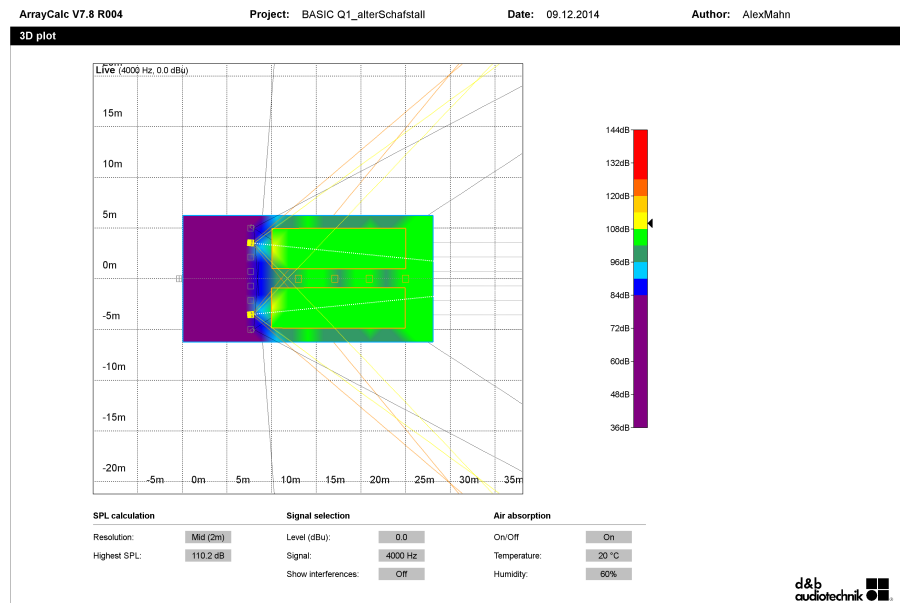
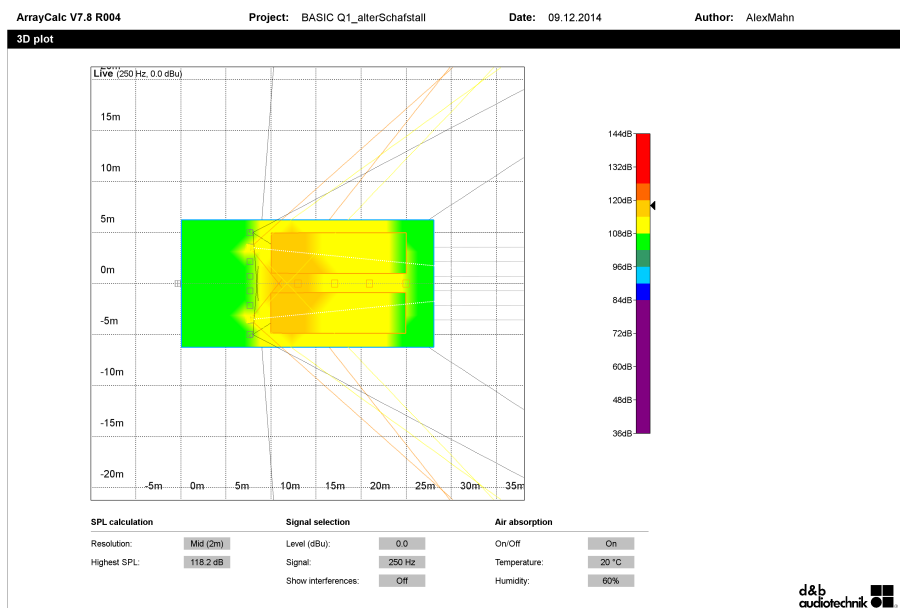


Fig. 9: Gehäuseabmessungen Q1 in mm [Zoll]



Anhang 2: 5x Q1 pro Seite. Direktschallverteilung und Richtwirkung bei 4 kHz



Anhang 3: 5x Q1 pro Seite. Direktschallverteilung und Richtwirkung bei 250 Hz

Literaturverzeichnis

AHNERT Wolfgang, TENNHARDT Hans-Peter: Raumakustik. In: WEINZIERL Stefan (Hg.): Handbuch der Audiotechnik. 1. Auflage. Springer. Berlin/Heidelberg, 2008, S. 182-263

AHNERT Wolfgang, GOERTZ Anselm: Beschallungstechnik, Beschallungsplanung und Simulation. In: WEINZIERL Stefan (Hg.): Handbuch der Audiotechnik. 1. Auflage. Springer. Berlin/Heidelberg, 2008, S. 492-548

AHNERT Wolfgang, SCHMITT Wolfgang: Fundamentals to perform acoustical measurements, 2006 URL:
<http://renkusheinzsound.ru/easera/EASERAAAppendixUSPV.pdf> [Stand: 10.11.2014]

BARANEK Leo: Concert Halls and Opera Houses. Second Edition. Springer. New York/Berlin/Heidelberg/Hong Kong/London/Milan/Paris/Tokyo, 2004.

CREMER Lothar, MÜLLER Helmut: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1. Geometrische Raumakustik, Statistische Raumakustik, Psychologische Raumakustik. 2. Auflage. S. Hirzel Verlag. Stuttgart, 1978

CREMER Lothar, MÜLLER Helmut: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 2. Wellentheoretische Raumakustik. 2. Auflage. S. Hirzel Verlag. Stuttgart, 1976

EASE.afmg.eu: Tutorial Deutsch URL:
http://www.afmg-support.eu/SoftwareDownloadBase/EASE/ease_tutorial_deutsch.pdf
[Stand:01.11.2014]

FASOLD Wolfgang, SONNTAG Ernst, WINKLER Helgo: Bau- und Raumakustik. 1. Auflage. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1987

FASOLD Wolfgang, VERES Eva: Schallschutz und Raumakustik in der Praxis, Planungsbeispiele und konstruktive Lösungen. 1. Auflage. Huss Medien, Verlag für Bauwesen. Berlin, 1998

H.V. Fuchs und J. Hunecke: Einsatz von Membran-Absorbern in der Raumakustik 17. Tonmeistertagung 1992, Karlsruhe URL:
http://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/de/documents/Publikationen/IBP-Mitteilung/260_tcm45-80394.pdf [Stand: 12.11.2014]

GOERTZ Anselm: Lautsprecher. In: WEINZIERL Stefan (Hg.): Handbuch der Audiotechnik. 1. Auflage. Springer. Berlin/Heidelberg, 2008, S. 423-490

URBAN Marcel, HEIL Christian, BAUMAN Paul: Wavefront Sculpture Technology. AES Convention Paper. New York, 2001

URL: http://www.felusch.com/ton/003_Themen/Lautsprecher/L-ACOUSTICS/L-ACOUSTICS_-_AES_Preprint_2001_Wavefront_Sculpture%20Technology.pdf [Stand: 15.11.2014]

KUTTRUFF Heinrich: Room Acoustics. Fourth Edition. Spon Press. New York/London, 2003

KRAAK Wolfgang: Diffuse Schallfelder. In: FASOLD Wolfgang (Hg.), KRAAK Wolfgang (Hg.), SCHIRMER Werner (Hg.): Taschenbuch Akustik Teil 1. 1. Auflage. VEB Verlag Technik. Berlin, 1984, S. 95-109

MAIER Peter: Studioakustik. In: WEINZIERL Stefan (Hg.): Handbuch der Audiotechnik. 1. Auflage. Springer. Berlin/Heidelberg, 2008, S. 268-310

PETZOLD Ernst: Elementare Raumakustik. Bauwelt Verlag. Berlin, 1927

SABINE Wallace C.: Collected papers on acoustics, Havard Univ Press, Cambridge 1922. URL: <https://archive.org/stream/collectedpaperso00sabiueoft#page/n7/mode/2up> [Stand: 16.10.2014]

SENGPIEL Eberhardt: Berechnen der Nachhallzeit.

URL: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-RT60.htm> [Stand: 10.10.2014]

SENGPIEL Eberhardt: Raumresonanzen von Rechteckräumen.

URL: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-raum-moden.htm> [Stand: 12.11.2014]

SENGPIEL Eberhardt: Typische Lautsprecher Impedanzkurven

URL: <http://www.sengpielaudio.com/TypischeLautsprecherImpedanzKurven.pdf> [Stand: 01.12.2014]

VORLÄNDER Michael: Auralization. Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality. First Edition. Springer. Berlin. 2008

WÖHLE Wolfgang: Grundgleichungen des Schallfeldes und elementare Ausbreitungsvorgänge. In: FASOLD Wolfgang (Hg.), KRAAK Wolfgang (Hg.), SCHIRMER Werner (Hg.): Taschenbuch Akustik Teil 1. 1. Auflage. VEB Verlag Technik. Berlin, 1984, S. 23-31

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Mittweida, den 19. Dezember 2014

Alexander Mahn